

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

André Abelardo Tavares

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO  
COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO  
MULTIFÁSICO EM PRECIPITADORES  
ELETROSTÁTICOS**

Florianópolis

2015



André Abelardo Tavares

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO  
COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO  
MULTIFÁSICO EM PRECIPITADORES  
ELETROSTÁTICOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Patrick Kuo-Peng

Coorientador: Prof. Dr. Nelson Sadowski

Florianópolis

2015

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da  
Universidade Federal de Santa Catarina

A ficha catalográfica é confeccionada pela Biblioteca Central.

Tamanho: 7cm x 12 cm

Fonte: Times New Roman 9,5

Maiores informações em:

<http://www.bu.ufsc.br/design/Catalogacao.html>



André Abelardo Tavares

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO  
COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO  
MULTIFÁSICO EM PRECIPITADORES  
ELETROSTÁTICOS**

Esta Tese foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Doutor em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 18 de dezembro 2015.

---

Prof. Dr. Carlos Galup Montoro  
Coordenador do Curso

---

Prof. Dr. Patrick Kuo-Peng  
Orientador

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Nelson Sadowski  
Coorientador

---

Profa. Dra. Viviane Cristine Silva



---

Prof. Dr. Marcelo Grafulha Vanti

---

Prof. Dr. Walter Pereira Carpes Jr.

---

Prof. Dr. Jean Vianeí Leite



À minha esposa Nicole e ao meu filho Augusto. Aos meus pais, Waldir e Lenaide.  
À minha irmã, Gissele Tavares.



## AGRADECIMENTOS

Aos professores orientadores Patrick Kuo-Peng e Nelson Sadowski pelo apoio, disponibilidade e paciência para as orientações desta tese.

Aos colegas e professores do GRUCAD que de alguma forma contribuíram para finalização desta pesquisa.

Ao apoio do professor Carlos Renato Rambo para realização das medições de resistividade e constante dielétrica das cinzas analisadas.

Aos professores e colaboradores da Pós-Graduação da Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina pelo excelente trabalho prestado.

À Faculdade SATC e ao curso de engenharia elétrica em especial ao diretor Carlos Antônio Ferreira e ao professor Fábio Peruch no apoio para a realização deste trabalho.





*"A ciência nunca resolve um problema sem  
criar pelo menos outros dez"*

George Bernard Shaw



## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo e metodologia para analisar o desempenho de precipitadores eletrostáticos (PES). No intuito de otimizar o tempo computacional para aplicações em escala real, adotou-se a formulação fluidodinâmica multifásica contínua (MCFD) para obtenção das principais grandezas mecânicas do processo de limpeza de gases em PES. Outra parte do método calcula as grandezas elétricas, campo e potencial elétrico, a densidade de carga e de corrente e baseia-se no Método de Simulação de Cargas (MSC). Estes dois métodos são acoplados para avaliar o desempenho em alguns estudos de casos em PES de pequena e grande escala. Apresenta-se também, alguns procedimentos adotados para medir as principais propriedades que afetam a eficiência nos PES, como é o caso do diâmetro da partícula, a resistividade e a constante dielétrica de cinzas leves. Medições destas propriedades são realizadas e incluídas num dos estudos de caso dos PES simulados para uma usina termelétrica brasileira. Os resultados das simulações são comparados com os obtidos a partir de dados reais e de referências bibliográficas. As simulações apresentam resultados muito próximos aos obtidos a partir das referências citadas e também aos da planta real.

**Palavras-chave:** Precipitadores Eletrostáticos, Método de Simulação de Cargas, Fluidodinâmica, Campos Elétricos.



## ABSTRACT

This work presents a methodology to study and analyze the performance of electrostatic precipitators (PES). In order to optimize the computational time for applications in real scale, it was adopted the continuous multiphase fluid dynamics formulation (MCFD) to obtain the mechanical quantities of interest in the gas cleaning process in PES. Another part of the method calculates the electrical quantities, field and electric potential, charge density and current and it is based on the Charge Simulation Method(MSC). These two methods are coupled to evaluate the performance of some case studies for ESPs in small and large scale. Some procedures adopted to measure the most important properties affecting the efficiency of the PES, as the particle diameter, the resistivity and the dielectric constant of fly ash are also presented. These measurements are included in a model of coal-fired power plant. The simulation results of these case studies are compared with those obtained from real data and different references. The simulations show results similar to those obtained in the cited references and also to the coal-fired power plant.

**Keywords:** Particle filters, Electrostatic precipitators, Fluid dynamics, Gas discharges devices, Charge Simulation Method.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Precipitador eletrostático de uma usina termelétrica ...	33
Figura 2	Principais processos envolvidos na coleta das partículas no PES .....	34
Figura 3	Exemplos típicos de eletrodos de descargas .....	35
Figura 4	Diferentes geometrias de eletrodos de coleta .....	36
Figura 5	Eletrodos de descarga e coleta de um PES numa termelétrica .....	37
Figura 6	Circuito de Alimentação Típico de um precipitador eletrostático .....	38
Figura 7	Relação tensão versus corrente no secundário do transformador de um PES .....	39
Figura 8	Descarga típica no secundário de um precipitador .....	40
Figura 9	Exemplo de batedores utilizando martelos .....	41
Figura 10	Exemplo de coletores de uma usina termelétrica .....	42
Figura 11	Processo de Ionização .....	43
Figura 12	Processo de formação de descarga <i>glow corona</i> .....	44
Figura 13	Processo de formação de descarga <i>streamer corona</i> .....	44
Figura 14	Processo de Avalanche .....	45
Figura 15	Moléculas do gás ionizado migrando na direção da placa coletora .....	46
Figura 16	Processo de carregamento por campo das partículas no precipitador .....	48
Figura 17	Partícula com carga de saturação .....	48
Figura 18	Processo de carregamento contínuo por campo .....	49
Figura 19	Processo de carregamento por Difusão .....	51
Figura 20	Variação da eficiência em função do diâmetro da partícula .....	58
Figura 21	Micrografia amostra de cinza leve .....	59
Figura 22	Efeito da resistividade da camada de poeira na velocidade de migração .....	61
Figura 23	Comportamento da resistividade em relação a temperatura .....	62
Figura 24	Representação da distribuição de três cargas no espaço. ....	67
Figura 25	Aplicação do MSC à um eletrodo .....	68

Figura 26 Definição do fator de atribuição .....	73
Figura 27 Fluxograma implementado para o MSC.....	77
Figura 28 Arranjo de duas cascas cilíndricas com polaridades opostas .....	78
Figura 29 Distribuição das equipotenciais para a primeira simulação	78
Figura 30 Distribuição das equipotenciais para a segunda simulação	79
Figura 31 Valores de erro em função dos pontos de teste .....	79
Figura 32 Precipitador Placa Fio.....	80
Figura 33 Modelagem do Precipitador Placa Fio para o MSC ....	81
Figura 34 Campo Elétrico simulado no MSC e por (ELMOURSI; CASTLE, 1987) .....	82
Figura 35 Potencial elétrico simulado no MSC e por (ELMOURSI; CASTLE, 1987) .....	82
Figura 36 Disposição das placas defletoras .....	83
Figura 37 Disposição das placas de defletoras .....	83
Figura 38 Deslocamento da gota de tinta sob ação do campo elétrico	84
Figura 39 Comparação entre o valor de campo ideal e o simulado pelo MSC.....	84
Figura 40 Modelos utilizados para escoamentos multifásicos .....	88
Figura 41 Tipos de escoamentos multifásicos .....	89
Figura 42 Funcionamento da interação do MCFD e do MSC.....	101
Figura 43 Malhas do MCFD (A) e do MSC (B) .....	102
Figura 44 Célula do MCFD (SYAMLAL; ROGERS; BRIEN, 1993) ...	102
Figura 45 Determinação da densidade de carga nas partículas ....	107
Figura 46 Modelo de um PES para uma termelétrica.....	112
Figura 47 Malha MCFD para o PES da figura 46 .....	113
Figura 48 Pontos do MSC de uma região do PES da figura 46....	114
Figura 49 Modelo de PES utilizado por (PARASRAM, 2001).....	116
Figura 50 Modelo do PES para a escala de laboratório (PARASRAM, 2001) .....	116
Figura 51 Malha do MCFD para o PES em escala de laboratório.	118
Figura 52 Localização dos pontos de contorno e cargas fictícias do MSC .....	119
Figura 53 Linhas equipotenciais em p.u. para o PES de laboratório	120
Figura 54 Linhas equipotenciais em p.u. segundo (LONG, 2010) ..	120



Figura 55	Densidade de cargas em p.u. ao longo do PES .....	121
Figura 56	Densidade de cargas em p.u. ao longo do PES (LONG, 2010) .....	121
Figura 57	Equipotenciais no quadrante 0ACB (figura 48) .....	122
Figura 58	Distribuição do módulo do Campo Elétrico ao longo de OA (figura 48) .....	123
Figura 59	Densidade de cargas ao longo de OA (figura 48) .....	123
Figura 60	Fluxo de gás e sólidos ao longo do PES .....	124
Figura 61	Distribuição do gás e sólidos ao longo do eixo z .....	124
Figura 62	Modelo de PES utilizado por (EEDEN, 2003) .....	125
Figura 63	Modelo adotado para o PES de uma termelétrica .....	126
Figura 64	Região da malha do MCFD para o PES .....	128
Figura 65	Localização dos pontos de contorno e cargas fictícias do MSC .....	128
Figura 66	Equipotenciais ao longo do precipitador .....	129
Figura 67	Equipotenciais no quadrante 0ACB (figura 48) .....	130
Figura 68	Densidade de cargas ao longo do segmento OA (figura 48) .....	130
Figura 69	Módulo do Campo Elétrico ao longo do segmento OA (figura 48) .....	131
Figura 70	Concentração do fluxo de gás e sólidos na entrada do PES .....	132
Figura 71	Concentração do fluxo de gás e sólidos na saída do PES .....	132
Figura 72	Distribuição do gás e sólidos ao longo do precipitador .....	133
Figura 73	Concentração de partículas ao longo do eixo y .....	133
Figura 74	PES de uma usina brasileira .....	134
Figura 75	Resultados das medições das constantes dielétricas da cinza .....	137
Figura 76	Resistividade da cinza coletada .....	138
Figura 77	Modelo adotado para o PES de uma termelétrica .....	139
Figura 78	Região da malha do MCFD para o PES .....	141
Figura 79	Localização dos pontos de contorno e cargas fictícias do MSC .....	141
Figura 80	Equipotenciais ao longo do precipitador .....	142
Figura 81	Equipotenciais no quadrante 0ACB (figura 48) .....	143
Figura 82	Densidade de cargas ao longo do segmento OA (figura	

48).....	143
Figura 83 Módulo do Campo Elétrico ao longo do segmento OA (figura 48) .....	144
Figura 84 Concentração do fluxo de gás e sólidos na entrada do PES .....	145
Figura 85 Concentração do fluxo de gás e sólidos na saída do PES	145
Figura 86 Distribuição do gás e sólidos ao longo do precipitador .	146
Figura 87 Concentração de partículas ao longo do eixo y .....	146
Figura 88 Equipamento utilizado para o peneiramento .....	165
Figura 89 Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 4.....	166
Figura 90 Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 6.....	166
Figura 91 Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 12.....	167
Figura 92 Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 20.....	167
Figura 93 Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 30.....	168
Figura 94 Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 40.....	168
Figura 95 Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 50.....	169
Figura 96 Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 70.....	169
Figura 97 Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 100.....	170
Figura 98 Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 140.....	170
Figura 99 Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 200.....	171
Figura 100 Distribuição Granulométrica da cinza - Prato.....	171
Figura 101 Carga Pontual.....	175
Figura 102 Linhas Infinitas.....	175

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Faixas de resistividade (EPA, 2012) .....	59
Tabela 2	Resumo da análise química de cinza leve de carvão do sul do Brasil .....	60
Tabela 3	Dimensões para o modelo da figura 50 .....	115
Tabela 4	Distribuição granulométrica das partículas .....	117
Tabela 5	Condições de operação e as características do gás e sólidos .....	117
Tabela 6	Quantidades e dimensões das células MCFD por eixo ..	118
Tabela 7	Distâncias adotadas entre pontos no MSC .....	118
Tabela 8	Comparação da Eficiência - Escala de Laboratório .....	124
Tabela 9	Dimensões para o modelo da figura 63 .....	126
Tabela 10	Distribuição granulométrica das cinzas (EEDEN, 2003) .	127
Tabela 11	Condições de operação e dados de fabricante (EEDEN, 2003) .....	127
Tabela 12	Quantidades e dimensões das células MCFD por eixo ..	127
Tabela 13	Distâncias adotadas entre os pontos no MSC .....	128
Tabela 14	Comparação da Eficiência .....	134
Tabela 15	Distribuição granulométrica das cinzas .....	135
Tabela 16	Caracterização das Cinzas Estudadas .....	136
Tabela 17	Valores máximos e mínimo da constante dielétrica .....	137
Tabela 18	Dimensões para o modelo da figura 77 .....	140
Tabela 19	Condições de operação e dados de fabricante .....	140
Tabela 20	Quantidades e dimensões das células MCFD por eixo ..	141
Tabela 21	Distâncias adotadas entre os pontos no MSC .....	142
Tabela 22	Comparação da Eficiência .....	146



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento .....	29
PES	Precipitador Eletrostático .....	30
MFIX	Multiphase Flow with Interphase Exchanges .....	31
MCFD	Formulação Fluidodinâmica Multifásica Contínua .....	32
MSC	Método de Simulação de Cargas .....	32
FDM	Método de Diferenças Finitas .....	65
FEM	Método de Elementos Finitos .....	65
CFD	Computacional Fluid dynamics .....	87
DNS	Método de Simulação Direta .....	87
LBM	Método de Lattice Boltzmann .....	87
DEM	Método de Elementos Discretos .....	87



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{J}(\vec{r})$	Densidade de Corrente iônica ( $A/m^2$ )	46
$\vec{r}$	Vetor posição	46
$D$	Coeficiente de difusão	46
$\rho_e(\vec{r})$	Densidade de carga ( $C/m^3$ )	46
$\mu_i$	Mobilidade do íon ( $m^2/V.s$ )	46
$\vec{E}(\vec{r})$	Vetor campo elétrico ( $V/m$ )	46
$t$	tempo de carregamento( $s$ )	49
$\varepsilon_0$	Permissividade no espaço livre ( $F/m$ )	49
$\varepsilon_r$	Permissividade relativa do material da partícula	49
$d_p$	Diâmetro da partícula ( $m$ )	49
$\rho_p$	Densidade média de carga das partículas ( $C/m^3$ )	52
$C_j$	Concentração de partículas no espaço ( $kg/m^3$ )	52
$m_{pj}$	Massa das partículas ( $kg$ )	52
$N_{pc}$	Número de partículas	52
$b_p$	Mobilidade média das partículas ( $m^2/V.s$ )	52
$q_j$	Carga da partícula ( $C$ )	52
$N_{pc}$	Número de partículas	52
$\omega$	Velocidade de migração das partículas ( $m/s$ )	53
$J$	Densidade de corrente na placa coletora ( $A/m^2$ )	55
$b$	Mobilidade do íon no ar ( $m^2/V.s$ )	55
$d$	Distância entre as placas ( $m$ )	55
$V_w$	Tensão aplicada no eletrodo de descarga ( $V$ )	55
$V_0$	Tensão de início de corona ( $V$ )	55
$E_1$	Campo Elétrico médio ( $V/m$ )	55
$E_0$	Campo elétrico para ruptura do gás ( $V/m$ )	55
$s$	Distância entre eletrodos de descarga ( $m$ )	55
$r_{eff}$	Raio cilíndrico equivalente ( $m$ )	55
$r_0$	Raio corona ( $m$ )	55
$r_w$	Raio do eletrodo de descarga ( $m$ )	55
$\eta$	Eficiência do precipitador	56
$A$	Área efetiva de coleta ( $m^2$ )	56
$Q$	Fluxo do gás no precipitador ( $m^3/s$ )	56

$\phi$	Potencial Elétrico ( $V$ ).....	65
$\rho_v$	Densidade Volumétrica de Carga ( $C/m^3$ ).....	65
$S$	Área ( $m^2$ ).....	65
$\vec{D}$	Densidade de Fluxo Elétrico ( $C/m^2$ ).....	65
$P_{ij}$	Coefficientes de Potenciais.....	67
$Q_j$	Cargas individuais ( $C$ ).....	67
$[P_s]$	Matriz dos Coeficientes de Potenciais das Cargas no Espaço	71
$[Q_s]$	Vetor de cargas no Espaço.....	71
$[P_s]$	Matriz dos Coeficientes de Potenciais das Cargas no Espaço	72
$[Q_s]$	Vetor de cargas no Espaço ( $C$ ).....	72
$[P_s]$	Matriz dos Coeficientes de Potenciais das Cargas no Espaço	72
$[Q_s]$	Vetor de cargas no Espaço ( $C$ ).....	72
$f_a$	Fator de atribuição.....	73
$a_1$	Distância entre dois pontos de contorno consecutivos.....	73
$a_2$	Distância entre uma carga de simulação e seu ponto de con- torno.....	73
$\varepsilon_m$	Fração de Volume do sólido ( $m^3$ ).....	91
$\varepsilon_g$	Fração de Volume do gás ( $m^3$ ).....	91
$U_{mi}$	Velocidade do sólido ( $m/s$ ).....	91
$U_{gi}$	Velocidade do gás ( $m/s$ ).....	91
$\rho_m$	Densidade do sólido ( $kg/m^3$ ).....	91
$\rho_g$	Densidade do gás ( $kg/m^3$ ).....	91
$T$	Tensor de tensão ( $Pa$ ).....	91
$S_i$	Tensor de interação de tensão ( $Pa$ ).....	91
$b_{gi}$	Força de campo no gás ( $N/m^3$ ).....	91
$b_{mi}$	Força de campo no sólido ( $N/m^3$ ).....	91
$T_g$	Tensor de tensão no gás ( $Pa$ ).....	91
$T_m$	Tensor de tensão no sólido ( $Pa$ ).....	91
$m_g$	Massa do gás ( $kg$ ).....	91
$m_m$	Massa do sólido ( $kg$ ).....	91
$P_g$	Pressão do gás ( $Pa$ ).....	94
$M_w$	Peso Molecular (-).....	94
$T_g$	Temperatura do gás ( $K$ ).....	94
$R$	Constante dos gases ideais ( $8,31 J/Mol.K$ ).....	94
$\vec{F}_e$	Força devido ao carregamento das partículas.....	107



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	29
1.1 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES	31
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	32
<b>2 PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS (PES)</b>	33
2.1 INTRODUÇÃO	33
2.2 COMPONENTES E SISTEMAS	35
2.2.1 Eletrodo de Descarga	35
2.2.2 Eletrodo de Coleta ou Placa Coletora	36
2.2.3 Sistema de Alimentação	36
2.2.4 Batedores ou Martelos	41
2.2.5 Coletores	42
2.3 CARREGAMENTO, MIGRAÇÃO E EFICIÊNCIA	42
2.3.1 Carregamento Contínuo por Campo	48
2.3.2 Carregamento Contínuo por Difusão	50
2.3.3 Migração e Coleta das Partículas	52
2.4 EFICIÊNCIA EM PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS	56
2.4.1 Fatores que Impactam na Eficiência	57
2.4.1.1 Diâmetros das Partículas	57
2.4.1.2 Resistividade das Partículas	58
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
<b>3 MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE CARGAS (MSC)</b>	65
3.1 INTRODUÇÃO	65
3.2 PRINCÍPIO BÁSICO	67
3.3 OBTENÇÃO DOS POTENCIAIS E CAMPOS ELÉTRICOS	69
3.4 CAMPOS ELÉTRICOS COM CARGAS ESPACIAIS	71
3.5 PRECISÃO DO MÉTODO	72
3.6 DETERMINAÇÃO DOS POTENCIAIS E CAMPOS ELÉTRICOS ATRAVÉS DO MSC	75
3.6.1 Cascas Cilíndricas Carregadas	76
3.6.2 Precipitador tipo placa fio	80
3.6.3 Simulação com cargas livres	81
3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
<b>4 FORMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA MULTIFÁSICA (MCFD)</b>	87
4.1 INTRODUÇÃO	87
4.2 MODELO CONTÍNUO GÁS-SÓLIDOS	89
4.2.1 Teoria de Misturas	90

<b>4.2.2 Método das Médias</b> .....	92
<b>4.3 CONSERVAÇÃO DA MASSA</b> .....	94
<b>4.3.1 Equação de estado</b> .....	94
<b>4.4 CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO</b> ..	95
<b>4.5 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO</b> .....	95
<b>4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	96
<b>5 ACOPLAMENTO DO MCFD E O MSC</b> .....	99
<b>5.1 INTRODUÇÃO</b> .....	99
<b>5.2 FUNCIONAMENTO DA METODOLOGIA</b> .....	100
<b>5.3 CARREGAMENTO DAS PARTÍCULAS</b> .....	104
<b>5.4 FORÇAS DEVIDO AO CAMPO ELÉTRICO</b> .....	107
<b>5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	109
<b>6 ESTUDOS DE CASOS</b> .....	111
<b>6.1 INTRODUÇÃO</b> .....	111
<b>6.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS</b> .....	112
<b>6.3 PRECIPITADOR EM ESCALA DE LABORATÓRIO</b> .....	115
<b>6.3.1 Resultados</b> .....	119
<b>6.4 USINA TERMELETRICA - ÁFRICA DO SUL</b> .....	125
<b>6.4.1 Resultados</b> .....	129
<b>6.5 USINA TERMELETRICA - BRASIL</b> .....	134
<b>6.5.1 Caracterização das cinzas da usina termelétrica</b> ....	135
<b>6.5.2 Modelo e Especificações do PES</b> .....	139
<b>6.5.3 Resultados</b> .....	140
<b>6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	147
<b>7 COMENTÁRIOS FINAIS</b> .....	149
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	153
<b>ANEXO A – Caracterização das Cinzas</b> .....	165
<b>ANEXO B – Coeficientes de Potencial</b> .....	175
<b>ANEXO C – Arquivo de Entrada do software MFIX</b> <b>(mfix.dat)</b> .....	179

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia traz necessariamente mudanças nos processos de obtenção de matéria-prima e também de produção na indústria. Para que se possa garantir uma maior produtividade, lucratividade e sustentabilidade é necessária a busca por novos e melhores métodos e técnicas aplicáveis no sentido de otimizar estes processos.

Para suprir todas as demandas, reflexo deste avanço, é necessário o aumento do número de indústrias. Por consequência, aumenta-se também o consumo dos recursos naturais e fontes de energia necessárias para suprir todas as necessidades advindas.

A geração de energia para suprir todas as nossas necessidades sempre passa por um processo de conversão, partindo de uma forma por exemplo química ou cinética para outra, no nosso caso mais comum, elétrica.

A matriz energética mundial, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, é composta principalmente por usinas movidas a carvão mineral. A geração de eletricidade mundial em 2011 era de 22.126 TWh sendo 41,3 % gerados a partir de carvão (IEA, 2013). Logo, estas usinas liberam uma quantidade bastante grande de resíduos que devem ser tratados.

Segundo (ABNT, 1985) poluição do ar trata-se da presença de um ou mais poluentes atmosféricos. Poluente atmosférico é toda e qualquer forma de matéria e ou energia que, segundo suas características, concentração e tempo de permanência no ar, possa causar ou venha a causar danos à saúde, aos materiais, à fauna e à flora e seja prejudicial à segurança, ao uso e ao gozo da propriedade, à economia e ao bem-estar da comunidade.

No Brasil a resolução n<sup>o</sup> 382 do CONAMA estabelece a partir do Programa Nacional de Controle de Poluição - PRONAR os limites máximos de emissão, ou seja, a quantidade máxima de poluentes permitível de ser lançada para a atmosfera e formas de diminuir o impacto causado por estas emissões. Para material particulado deverá ser adotado o método de medição de emissão de partículas em fonte pontual, conforme normas (ABNT, 1991, 1993b), ou outro método equivalente desde que aceito pelo órgão ambiental licenciador (CONAMA, 2006). Atualmente o BNDES estabelece como um dos critérios socioambientais para apoio a empreendimentos no segmento de geração elétrica a partir de termelétrica a carvão, o limite máximo de emissões de particulados de  $50 \text{ mg/Nm}^3$  (BNDES, 2015). Estes limites podem chegar

próximo a  $20 \text{ mg/Nm}^3$  para países como os Estados Unidos e China.

O processo de queima de carvão mineral em termelétricas e a forma como os rejeitos desta queima vêm sendo tratados estão se modernizando. No início o resultado da queima, gases e resíduos sólidos eram diretamente liberados na atmosfera sem qualquer tipo de tratamento. Na época não havia uma maior preocupação com resíduos. Os resíduos sólidos provenientes desta queima podem ser classificados em dois tipos, cinza leve (ou mosca) e cinza pesada (HEINECK; BICA; CONSOLI, 2002).

No Brasil são gerados aproximadamente três milhões de toneladas de cinzas por ano, sendo que 80 % destas são cinzas do tipo leve, com diâmetros médios de partículas próximos de  $50 \mu\text{m}$  e os outros 20 % de cinza pesada. As usinas termelétricas são responsáveis por noventa por cento desta produção enquanto o restante é produzido por indústrias (MENDES; CARNEIRO; PONTES, 2009; ROCHA et al., 1999).

Hoje, com a mudança de comportamento, além da limpeza dos gases, os materiais coletados, no caso, as cinzas, são reaproveitadas como por exemplo, nas indústrias de cimentos. O reaproveitamento das cinzas causa uma diminuição significativa de áreas destinadas a aterros, conservação dos recursos naturais, redução da emissão de dióxido de carbono, entre outros; estudos também apontam que há a melhoria na qualidade das argamassas que adicionam cinza a sua constituição, alterando como por exemplo, a permeabilidade e resistência (SIQUEIRA, 2011).

Os precipitadores eletrostáticos (PES) são equipamentos bastante antigos (datam do início do século XX) e até hoje são utilizados com sucesso no processo de coleta de partículas, em usinas termelétricas e indústrias que utilizam materiais fósseis para geração de energia.

Nesse contexto, as técnicas e métodos utilizados em modelos para a predição do comportamento dos gases, dos particulados e dos campos elétricos vêm evoluindo.

Estas ferramentas possibilitam uma melhoria no processo de fabricação, nos custos envolvidos e também na precisão para parametrizar estes equipamentos.

É de suma importância que o precipitador esteja dimensionado para atender aos requisitos das leis que estipulam os níveis máximos de emissões de particulados ao meio ambiente, que cada vez mais têm sido restritivas.

## 1.1 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES

Embora existam trabalhos que tratem isoladamente a modelagem das diferentes partes do funcionamento dos precipitadores eletrostáticos, como é o caso da modelagem do processo de carregamento das partículas, da distribuição do fluxo dos gases e sólidos, do funcionamento do sistema de alimentação e também da remoção dos particulados (YAMAMOTO; OKUDA; OKUBO, 2003; CHOI; FLETCHER, 1998; GALLIMBERTI, 1998; ADAMIAK, 2013), existe ainda uma necessidade em se desenvolver novos modelos que apresentem uma maior interação entre as diferentes áreas do processo, possibilitando assim, um melhor entendimento do efeito mútuo entre os diferentes fenômenos .

No intuito de modelar os fenômenos fluidodinâmicos e elétricos envolvidos no processo de precipitação e captura de particulados, propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de uma metodologia baseada no modelo multifásico contínuo (Euleriano) e no método de simulação de cargas (MSC).

O software livre MFIX (Multiphase Flow with Interphase Exchanges), (SYAMLAL; ROGERS; BRIEN, 1993) será uma das ferramentas utilizadas na metodologia e simulará o modelo multifásico contínuo Euleriano considerando algumas das principais características que afetam o rendimento do PES. Dentre estas pode-se citar: os diâmetros das partículas, a velocidade, a pressão, a temperatura, a densidade, a resistividade e a permissividade do material.

Outra parte da metodologia, utiliza um código desenvolvido neste trabalho para implementar o MSC. Neste são calculadas as grandezas elétricas, o potencial elétrico, a densidade de carga elétrica e o campo elétrico.

Finalmente, o acoplamento entre os dois métodos é feito incluindo as contribuições das forças que atuam sobre as partículas dispersas no gás devido ao efeito do campo elétrico, ao longo de todo o PES. Como resultado, será possível visualizar as distribuições dos perfis de velocidades dos sólidos e gases e calcular a eficiência do processo.

Em relação ao que já foi desenvolvido na área, este trabalho propõe as seguintes contribuições:

1. Apresentar uma nova metodologia de simulação numérica por meio de uma ferramenta de cálculo fluidodinâmico contínuo multifásico (MCFD), ou método Euleriano, em conjunto com outro método para obtenção das grandezas elétricas (MSC) e que serão utilizadas na verificação dos principais parâmetros de desempe-

nho envolvidos no processo de coleta de particulados em PES;

2. Comparar os resultados e desempenho computacional obtidos a partir da metodologia proposta utilizando a formulação fluidodinâmica multifásica contínua (MCFD) e MSC, com os trabalhos de outros autores para as mesmas aplicações em PES de pequena e grande escala;
3. Aplicar esta nova metodologia num estudo de caso de um modelo de PES com as características daqueles utilizados em usinas termelétricas brasileiras;
4. Disponibilizar as ferramentas desenvolvidas para futuros trabalhos desenvolvidos no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD), no intuito de continuidade das pesquisas relacionadas aos assuntos e aplicações abordadas.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para uma melhor compreensão de todo o funcionamento do processo de modelagem do precipitador eletrostático, este trabalho foi dividido em sete capítulos seguindo a seguinte ordem:

Primeiro Capítulo: apresenta uma introdução geral do problema a ser resolvido.

Segundo Capítulo: aborda os principais componentes e equações envolvidas no processo de carregamento e coleta de particulados em precipitadores eletrostáticos.

Terceiro Capítulo: apresenta as fundamentações inerentes ao método de simulação de cargas, utilizado na obtenção dos campos elétricos no precipitador.

Quarto Capítulo: são apresentados os principais conceitos relacionados à formulação fluidodinâmica multifásica aplicada à modelagem proposta.

Quinto Capítulo: expõe como é feito o acoplamento do modelo fluidodinâmico multifásico MCFD com o método MSC.

O sexto capítulo apresenta alguns estudos de casos, mostrando-se os resultados de simulações obtidas a partir da metodologia proposta.

Finalmente, no sétimo capítulo são expostos comentários finais sobre o trabalho.

## 2 PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS (PES)

### 2.1 INTRODUÇÃO

Segundo (ABNT, 1985) precipitadores eletrostáticos são equipamentos que separam e coletam partículas em suspensão num fluxo gasoso por meio de um campo eletrostático unidirecional ionizante.

Precipitadores eletrostáticos são usados em muitas indústrias porque apresentam uma alta eficiência na coleta de partículas. Eles foram originalmente desenvolvidos no início do século XX para controle de névoa ácida.

Durante os anos quarenta, os precipitadores começaram a ser utilizados para o controle das partículas das caldeiras de carvão e fornos de cimento. As aplicações de precipitadores têm aumentado desde 1940 devido à sua capacidade para transmitir grandes forças eletrostáticas para a separação das partículas de fluxo de gás sem impor resistência.

A eficiência dos precipitadores eletrostáticos e a confiabilidade melhoraram, desde a década de setenta, como resultado de programas de pesquisa e desenvolvimento patrocinados pelos fabricantes de equipamentos e associações comerciais.

A figura 1 apresenta uma configuração típica de um precipitador eletrostático de uma usina termelétrica.

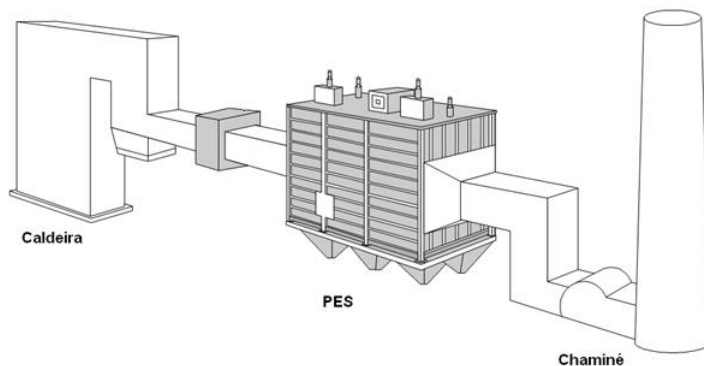


Figura 1 – Precipitador eletrostático de uma usina termelétrica

Inicialmente na figura 1, o carvão é queimado na caldeira e os

gases e particulados resultantes desta combustão são expelidos e chegam ao PES. Estes particulados são coletados no PES e o gás filtrado é então expelido à atmosfera pela chaminé da usina. Além da captação dos particulados, outros equipamentos também são utilizados na limpeza dos gases. Estes atuam na redução dos níveis de óxidos de enxofre e nitrogênio e não estão representados na figura 1 por não fazerem parte do escopo deste trabalho.

Segundo (JAWOREK; KRUPA; CZECH, 2007), há diferentes configurações possíveis de precipitadores sendo que estas estão relacionadas com as configurações dos elementos geradores de cargas elétricas (eletrodo de descarga), o método de remoção do material coletado que pode ser a seco, ou úmido, e o tipo de material coletado.

Independente do tipo de precipitador eletrostático, as etapas do processo de limpeza do particulados nos gases são as mesmas, e estão apresentadas na figura 2.

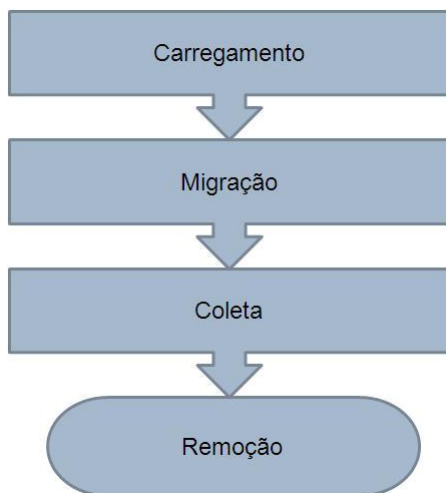


Figura 2 – Principais processos envolvidos na coleta das partículas no PES

A primeira etapa refere-se ao carregamento elétrico das partículas presentes no gás, estas partículas carregadas migram para a superfície de coleta, e ocorre então, o processo de sedimentação do material coletado, podendo ser este por gravidade, ou drenagem, no caso de líquidos. A última etapa é a remoção dos sólidos ou líquidos acumulados abaixo da zona eletricamente energizada.



Na sequência serão apresentados em mais detalhes os componentes e sistemas utilizados no funcionamento dos PES e algumas formulações importantes que servirão como base para a modelagem proposta neste trabalho.

## 2.2 COMPONENTES E SISTEMAS

Inicialmente para um melhor entendimento do funcionamento deste equipamento é necessário apresentar os principais sistemas e componentes, sendo estes: eletrodo de descarga, eletrodo de coleta ou placa coletora, sistema de alimentação, batedores e coletores.

### 2.2.1 Eletrodo de Descarga

A função deste eletrodo é de criar um campo elétrico de grande intensidade com objetivo de ionizar as partículas componentes do gás que será filtrado. Inicialmente eram fabricados utilizando fios geralmente em aço, atualmente podem ser encontrados em cobre, titânio e alumínio dependendo da aplicação, alguns exemplos estão apresentados na Figura 3.

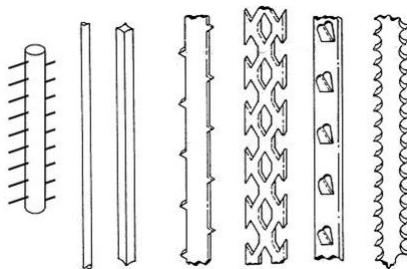


Figura 3 – Exemplos típicos de eletrodos de descargas  
(EPA, 1980)

Um problema encontrado na utilização de fios para confecção dos eletrodos de descarga era que eles podiam ficar balançando no interior do precipitador. Para eliminar este problema foram criados os eletrodos rígidos, que evitam este tipo de situação.

### 2.2.2 Eletrodo de Coleta ou Placa Coletora

A função deste eletrodo é de atrair e manter aderidas nestas placas as partículas carregadas que serão posteriormente removidas. São compostos geralmente por placas dispostas verticalmente (entre 6 e 12 metros de altura), fabricadas geralmente em aço carbono, mas também podem ser encontradas em outros tipos de material dependendo do tipo de aplicação. Alguns exemplos de geometrias de placas podem ser vistas na Figura 4.

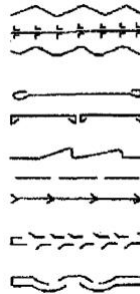


Figura 4 – Diferentes geometrias de eletrodos de coleta  
(MIZUNO, 2000)

A espessura destas placas varia de 0,05 a 0,2 centímetros. Para precipitadores que utilizam cabos, o espaçamento entre os eletrodos de descarga e o eletrodos de coleta ficam em torno de 15 a 30 centímetros. Nos PES que utilizam eletrodos rígidos o espaçamento fica entre 30 e 40 centímetros.

A figura 5 apresenta parte de um PES de uma usina termelétrica com os eletrodos de descarga tipo rígido e a placa coletora.

### 2.2.3 Sistema de Alimentação

Sua função é gerar e controlar a intensidade do campo elétrico entre os eletrodos de descarga e de coleta. Para que este sistema funcione são necessários alguns equipamentos principais como: o transformador, o retificador para alta tensão e finalmente os sistemas de controle e de

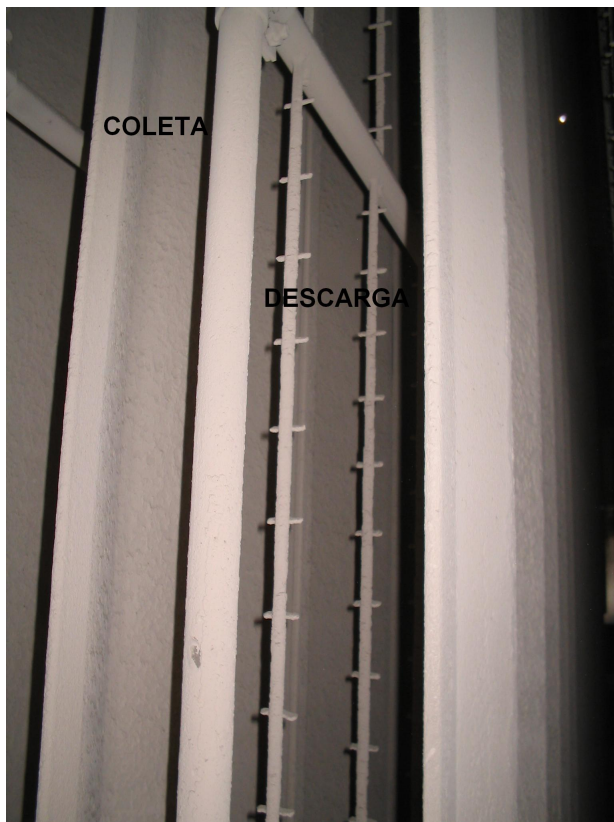


Figura 5 – Eletrodos de descarga e coleta de um PES numa termelétrica

proteção. Um sistema típico é apresentado na figura 6.

Para sistemas reais típicos os precipitadores estão geralmente conectados a uma fonte alternada de 60 Hz e 480 V.

À medida que a tensão aplicada ao primário do transformador aumenta, a tensão no secundário aplicada aos eletrodos de descarga também aumenta.

Descargas elétricas estáveis começam a ocorrer quando a tensão secundária excede a tensão de início de corona, que pode situar-se entre 15 e 25 quilovolts, dependendo, em parte, do tamanho e do formato do eletrodo de descarga.

Uma curva típica de tensão versus corrente no secundário é mos-

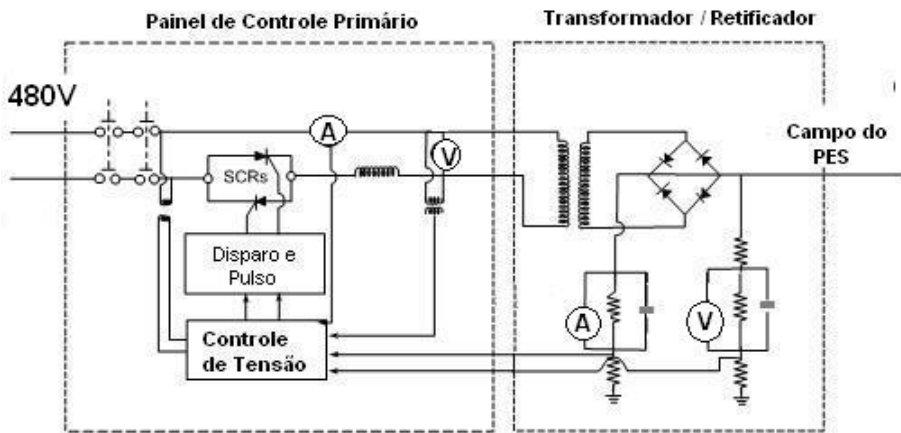


Figura 6 – Circuito de Alimentação Típico de um precipitador eletrostático

(CROWDER; HARRISON; SMITH, 2000)

trada na figura 7, onde a tensão "Onset Voltage" marca o início do efeito corona e o ponto "spark over" é quando começam a ocorrer faíscas entre o eletrodo de descarga e de coleta no interior do PES.

Este sistema deve manter a intensidade do campo elétrico no maior valor possível, de tal forma que, o número de centelhas produzidas entre o eletrodo de descarga e de coleta não comprometa a eficiência do processo de precipitação.

O transformador elevará a tensão a um nível que as partículas do gás possam ser ionizadas, podendo variar sua tensão no primário desde algumas centenas de volts e sua tensão no secundário na faixa de quilovolts.

O controlador automático de tensão é projetado para aumentar a tensão do primário ao ponto máximo em qualquer instante. Alguns fatores como: tensão primária, corrente do secundário, corrente no primário, taxa de descargas e o ângulo de condução dos tiristores limitam a máxima tensão secundária.

Excesso de descargas pode danificar alguns componentes do PES. Sempre que qualquer um dos limites citados anteriormente é atingido, o controlador automático de tensão diminui a tensão do primário para proteger os circuitos elétricos.

Depois do início das primeiras faíscas, o controlador automático

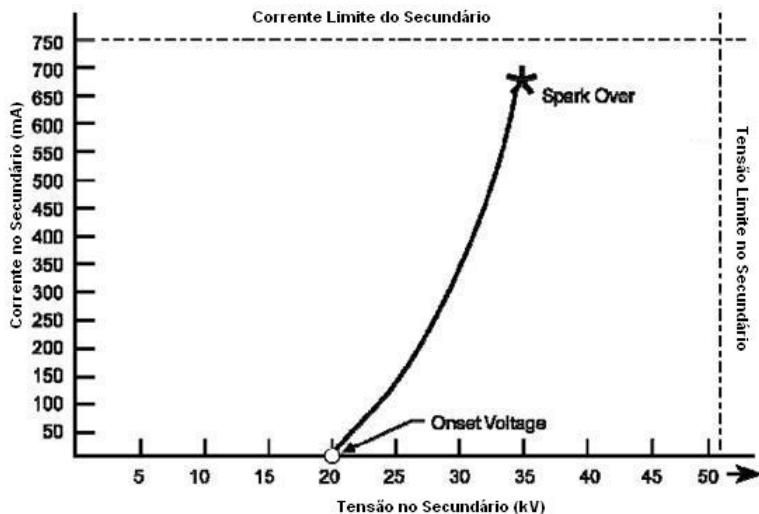


Figura 7 – Relação tensão versus corrente no secundário do transformador de um PES

(CROWDER; HARRISON; SMITH, 2000)

de tensão desliga a tensão primária durante um curto período de tempo (milissegundos), evitando assim, que estas faíscas de curta duração se tornem constantes, gerando um arco prejudicial sustentável conforme figura 8.

Uma vez que este período é finalizado, a tensão é ajustada rapidamente para uma tensão muito próxima daquela na qual a faísca ocorreu. Geralmente, estas variações aparecem como flutuações muito breves de tensão no secundário.

Para garantir que este sistema esteja operando de acordo com o esperado, é necessária a utilização de um sistema de controle e supervisão que se baseará nas medições de tensão e corrente elétrica no primário, no secundário do transformador e na ponte retificadora. Outra medição importante é o número de faíscas por minuto do equipamento.

No sentido de maximizar a eficiência na coleta no processo de carregamento no PES, o maior campo possível e densidade de corrente são empregados. Na prática, tanto o campo elétrico como a densidade

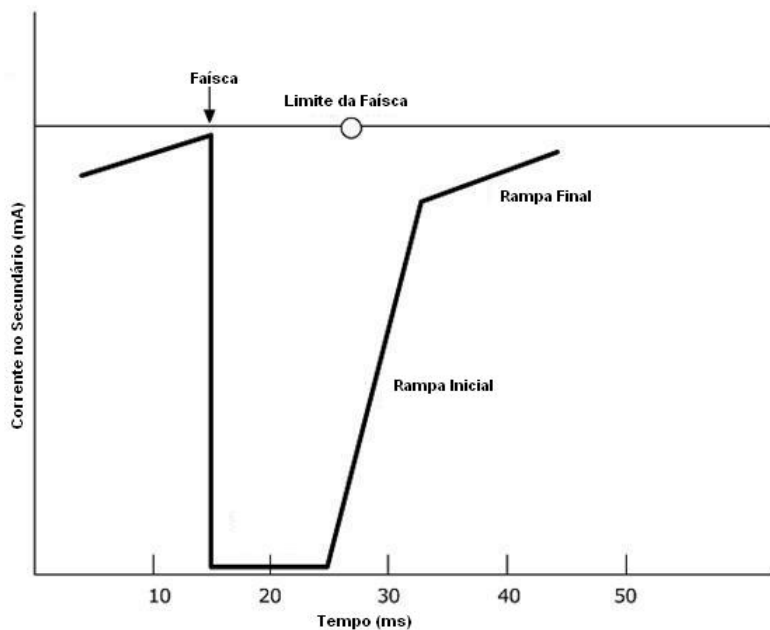


Figura 8 – Descarga típica no secundário de um precipitador (CROWDER; HARRISON; SMITH, 2000)

de corrente são limitados pelas descargas elétricas que ocorrem entre os eletrodos ou através da camada de poeira depositada.

Altos valores de potencial aplicado e densidade de corrente são desejáveis devido aos seus efeitos no carregamento e no transporte das partículas para o eletrodo de coleta.

De uma maneira geral as características de tensão versus corrente do precipitador dependem da geometria dos eletrodos, da composição do gás, da temperatura, da pressão, da concentração, das dimensões das partículas e da resistividade das cinzas coletadas. Estes máximos valores de tensão e corrente podem variar bastante de um precipitador para outro e de uma aplicação para outra.

### 2.2.4 Batedores ou Martelos

Os batedores são utilizados para retirar todas as partículas acumuladas nos eletrodos de coleta e descarga. O processo de remoção pode ser feito utilizando vibração, impulsos mecânicos ou impulsos magnéticos. Na figura 9 é apresentado um sistema utilizando impulsos mecânicos através de martelos para remoção das partículas.



Figura 9 – Exemplo de batedores utilizando martelos

Cada batedor ou martelo atua em determinadas fileiras de eletrodos, estas são limpas em conjunto por meio de uma barra que transfere impulsos mecânicos gerando vibrações. Os martelos são instalados defasados para que fileiras vizinhas não atuem no mesmo momento.

Um sistema individual de batedores atua em cada campo do precipitador, possibilitando assim que possa ser limpo individualmente e ajustado para atuar por determinados períodos.

O valor ótimo deste intervalo de tempo que facilite a remoção evitando solidificação do material coletado e também não prejudique a coleta dependerá do tipo de precipitador, das condições de operação e das características do material a ser coletado. Geralmente este valor é obtido empiricamente baseado na experiência dos operadores.

### 2.2.5 Coletores

Local onde fica armazenado temporariamente todo o material particulado retido durante o processo de filtragem. Na figura 10 são apresentados alguns coletores utilizados numa usina termelétrica.



Figura 10 – Exemplo de coletores de uma usina termelétrica

Quando a quantidade de material a ser removida é elevada, pode-se utilizar um sistema de ar comprimido para deslocamento do material particulado dos coletores para silos onde a capacidade de armazenamento é muito maior.

## 2.3 CARREGAMENTO, MIGRAÇÃO E EFICIÊNCIA

Conforme já apresentado na figura 2, o processo de precipitação envolve diferentes etapas: o carregamento, a migração, a coleta e finalmente a remoção das partículas no PES. A seguir, serão apresentados os principais conceitos e equações do processo de carregamento das partículas, e que serão utilizadas para aplicação da metodologia proposta neste trabalho.

Para produzir um grande número de cargas num gás, ou seja, para o gás ser ionizado, um elevado campo elétrico deve ser criado. Isto é possível aplicando uma grande diferença de potencial entre um eletrodo que apresenta uma pequena área (eletrodo de descarga) e outro com uma área bem maior (eletrodo de coleta), como mostrado na Figura



11.

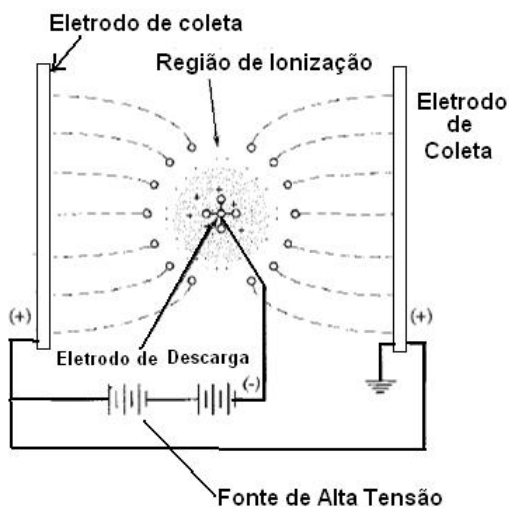


Figura 11 – Processo de Ionização  
(MIZUNO, 2000)

Através destes eletrodos são geradas descargas corona. No caso dos PES, existem basicamente dois tipos de descargas corona: *glow corona* e *streamer corona*, que estão diretamente relacionadas com a forma de onda de tensão e com o formato do eletrodo de descarga, como pode ser observado nas figuras 12 e 13 (GALLIMBERTI, 1998).

Observa-se que para o caso das descargas *glow corona* figura 12, a região de ionização concentra-se ao longo de todo o entorno do eletrodo de descarga. Já no caso das descargas *streamer corona* apresentada na figura 13 o formato do eletrodo com uma ponta voltada para baixo faz com que a região de ionização concentre-se mais nesta pequena região, gerando processos de descargas diferentes.

Para PES que operam com tensão contínua ou em baixa frequência, a forma dominante de descarga é a *glow corona*, já as descargas *streamer corona* são encontradas nos PES que operam com pulsos de tensão. Detalhes a respeito de descargas *glow corona* podem ser encontrados no trabalho de (SIGMOND, 1982; JONES; DAVIES, 1992) e para *streamer corona* em (GALLIMBERTI, 1979).

Em geral, o eletrodo de descarga pode ser operado com polari-

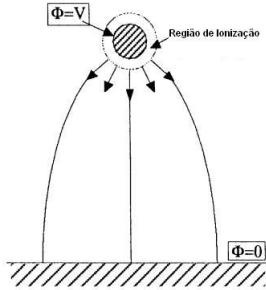


Figura 12 – Processo de formação de descarga *glow corona* (GALLIMBERTI, 1998)

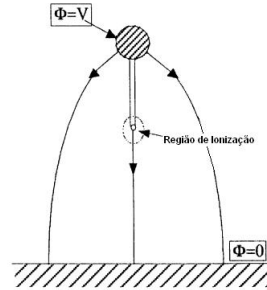


Figura 13 – Processo de formação de descarga *streamer corona* (GALLIMBERTI, 1998)

dade positiva ou negativa, porém, o início de corona negativo ocorre para valores mais altos de campo elétrico do que para corona positivo (MIZUNO, 2000). A maioria das aplicações industriais preferem operar com coronas negativos pois permitem uma maior faixa de operação dos equipamentos. Os eletrodos de descarga são energizados com altos valores de tensão negativa e as placas coletoras são aterradas semelhante ao apresentado na figura 11 (WHITE, 1963; OGLESBY; NICHOLS, 1978).

Para tensões aplicadas menores do que o valor de início de corona, um campo puramente eletrostático está presente. Para tensões acima da tensão de início de corona, o campo elétrico na vizinhança do eletrodo de descarga é grande o suficiente para produzir a ionização dos elétrons por impacto. Com isto, é gerado uma corrente elétrica entre os dois eletrodos indicando a presença das descargas corona.

Geralmente um gás contém por volta de  $10^{19}$  moléculas neutras por centímetro cúbico. Devido a presença do campo elétrico, os elétrons que estão no meio serão acelerados e separados rapidamente dos íons positivos restantes. Após uma pequena distância o elétron colidirá com outra molécula de gás neutra e um segundo elétron adicional será produzido, gerando energia cinética suficiente para a ionização.

Um efeito em avalanche inicia-se na região onde a magnitude do campo elétrico é alta o suficiente para levar os elétrons para um nível de energia capaz de ionizar o gás. Este processo, chamado multiplicação em avalanche, se repete continuamente gerando mais elétrons livres e íons positivos, conforme figura 14.

Íons recombinados e moléculas altamente ativadas emitem fótons,

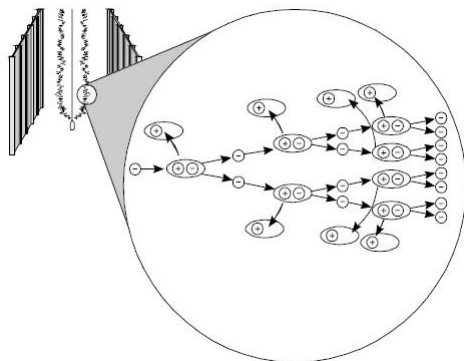


Figura 14 – Processo de Avalanche  
(EPA, 2012)

apresentando uma pequena nuvem azul ao redor do eletrodo de descarga e também ruído audível. Nesta região onde o processo de ionização ocorre, existe um campo elétrico não homogêneo nas superfícies do eletrodo e é chamada de zona ativa.

Os elétrons que saem da zona ativa chegam numa região onde o campo elétrico é menor, chamada zona passiva. Estes elétrons não são capazes de ionizar outras moléculas, mas ficam aderidos às moléculas eletronegativas do gás, como é o caso das moléculas de  $O_2$ ,  $SO_2$ ,  $Cl_2$ , formando íons negativos. Estes íons negativos naturalmente movem-se na direção dos eletrodos de coleta, conforme a figura 15 e são de extrema importância no processo de captura das partículas.

Assim, estes íons negativos migram para as placas coletoras, e constituem um estado de regime permanente na distribuição das cargas na região entre os eletrodos. Isto é referenciado como um espaço iônico de cargas.

Este espaço iônico de cargas estabelece um campo elétrico que é adicionado ao campo elétrico original do precipitador. A medida que a tensão aplicada aumenta, maior o espaço iônico de cargas. Isto leva a um alto campo elétrico médio e uma densidade de corrente entre os eletrodos. A extensão espacial da zona ativa corresponde a uma pequena porção da zona passiva, a separação das partículas do gás ocorre quase que totalmente na zona passiva (PARKER, 1997).

O estado e especialmente a composição do gás são determinantes para o desempenho elétrico do precipitador. O campo elétrico ne-

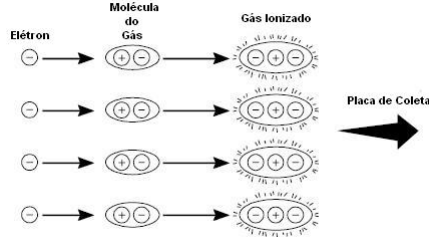


Figura 15 – Moléculas do gás ionizado migrando na direção da placa coletora

(EPA, 2012)

cessário para iniciar um processo de ionização contínuo dependerá da energia de ionização das espécies do gás e do caminho livre médio entre as colisões.

Modelos de carregamento de partículas calculam as densidades de correntes iônicas como função do tempo e do estado das cargas nas partículas. A densidade de corrente iônica pode ser calculada pela equação 2.1 (LAWLESS, 1996).

$$\vec{j}(\vec{r}) = -D\nabla\rho_c(\vec{r}) + \mu_i\rho_c(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) \quad (2.1)$$

Onde  $\vec{j}(\vec{r})$  é a densidade de corrente iônica ( $A/m^2$ ),  $\vec{r}$  é o vetor posição,  $D$  o coeficiente de difusão ( $m^2/s$ )  $\rho_c(\vec{r})$  a densidade de carga ( $C/m^3$ ),  $\mu_i$  a mobilidade do íon ( $m^2/V.s$ ), e  $\vec{E}(\vec{r})$  vetor campo elétrico ( $V/m$ ). Para se obter a quantidade de carga presente na partícula a corrente deve ser integrada sobre a superfície.

Existem dois modelos clássicos para prever a quantidade de cargas absorvidas por uma partícula exposta a íons positivos ou negativos em regime permanente. Estes dois modelos podem ser chamados de teoria de carregamento contínuo por campo e teoria de carregamento contínuo por difusão.

Na teoria de carregamento contínuo por campo, ou também chamado de carregamento por bombardeamento de íons, o transporte elétrico dos íons é feito ao longo das linhas de campo elétrico que interceptam a superfície das partículas, o efeito de difusão é desconsiderado, somente o termo com a presença do vetor campo elétrico  $\vec{E}(\vec{r})$  é considerado na equação 2.1.

A teoria de carregamento contínuo por difusão é baseada no

transporte difusivo dos íons devido ao gradiente de densidade de íons na superfície da partícula. Isto requer conhecimento da dependência espacial das densidades dos íons na vizinhança da partícula. Neste caso o efeito da carga da partícula no perfil da densidade do íon é considerado e o efeito do campo elétrico externo é desprezado, somente o termo que apresenta o coeficiente de difusão  $D$  na equação 2.1 é considerado (PARKER, 1997).

Importantes avanços nas teorias de carregamento têm sido apresentados utilizando modelos numéricos como também analíticos (MACDONALD, 1978; LAWLESS, 1996). Estudos nas áreas de carregamento por campo podem ser vistos nos trabalhos de (PAUTHENIER; MOREAU-HANOT, 1932; ROHMANN, 1923), e difusão (ARENDET; KALLMAN, 1926; CHANG, 1981; FUCHS, 1947, 1963; WHITE, 1951).

Uma análise para diferentes modelos numéricos considerando simulações dinâmicas de carregamento de partículas num PES foi feita por (LONG, 2010), onde foram classificadas cinco diferentes formas de carregamento de partículas para precipitadores eletrostáticos tipo duto.

Segundo (FJELD; GAUNTT; MCFARLAND, 1983) para partículas com diâmetros médios menores do que  $1\mu\text{m}$  e sob a influência de baixa intensidade de campo elétrico externo (menores do que  $300\text{ kV/m}$ ), há uma boa aproximação entre as formulações clássicas da teoria de difusão e os resultados experimentais.

A medida que o tamanho das partículas e a intensidade do campo elétrico aumentam, os dados experimentais se aproximam mais dos modelos baseados na teoria de carregamento por campo (FJELD; GAUNTT; MCFARLAND, 1983; TURNER et al., 1992).

Nos casos intermediários em que os diâmetros médios de partículas estão entre  $0,1\text{ }\mu\text{m}$  e  $1\text{ }\mu\text{m}$  e os valores de campo elétrico são menores do que  $300\text{ kV/m}$ , os modelos geralmente incluem em sua formulação a influência dos dois tipos de carregamentos em sua formulação (COCHET, 1961; FJELD; MCFARLAND, 1989; LAWLESS, 1996; LIU; YEH, 1968; MURPHY; ADLER; PENNEY, 1959; SMITH; MCDONALD, 1976; LAWLESS, 1996; ??).

A partir das referências citadas a respeito das teorias de carregamento por campo e difusão, apresenta-se na sequência, um resumo das principais equações e conceitos utilizados no desenvolvimento dos modelos deste trabalho.

### 2.3.1 Carregamento Contínuo por Campo

Uma vez que esteja estabelecido o campo elétrico e uma corrente iônica conforme equação 2.1, o carregamento das partículas se inicia. Em qualquer instante de tempo e localização no espaço perto da partícula, o campo elétrico total é a soma do campo elétrico devido a carga da partícula e do campo elétrico aplicado.

Como já citado anteriormente, carregamento de partículas por campo é o modo dominante de carregamento em partículas grandes, aquelas que têm diâmetros médios maiores do que cerca de  $1\ \mu\text{m}$ . Quanto maior for a área das partículas (normal às linhas de campo elétrico local) maior será taxa de intercepção de cargas.

A figura 16 apresenta o processo de carregamento por campo no momento em que a partícula está migrando para a placa coletora. Na figura 17 está representada uma partícula que já atingiu o seu limite de saturação, neste caso os íons que tentam aderir à partícula são expelidos.

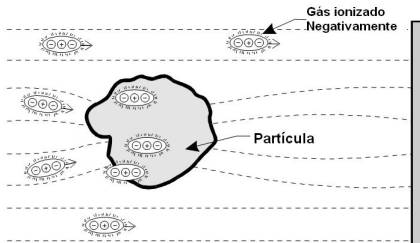


Figura 16 – Processo de carregamento por campo das partículas no precipitador (EPA, 2012)

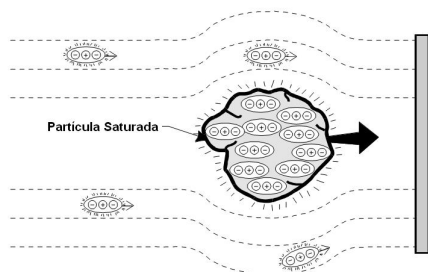


Figura 17 – Partícula com carga de saturação (EPA, 2012)

A figura 18 apresenta a configuração do campo elétrico uma vez que a partícula atinge a carga de saturação. Neste caso, linhas de campo elétrico circundam a partícula e os íons movem-se ao longo da partícula. Carregamento por campo ocorre muito rapidamente e termina quando cargas suficientes (carga de saturação) estão acumuladas e repelem íons adicionais.

A carga de uma partícula esférica devido ao processo de carregamento por campo, ao longo do tempo, pode ser expressa pela equação 2.2 (PAUTHENIER; MOREAU-HANOT, 1932).

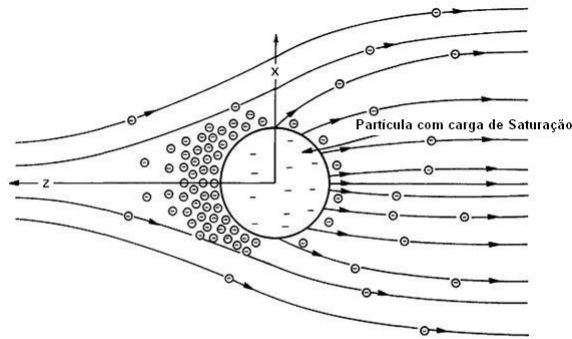


Figura 18 – Processo de carregamento contínuo por campo  
(MACDONALD, 1978)

$$q_f(t) = \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \pi \varepsilon_0 d_p^2 |\vec{E}| \left( 1 + \frac{4\varepsilon_0 |\vec{E}|}{Jt} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

$q_f(t)$ , a carga da partícula ( $C$ ),

$E$ , Campo elétrico ( $V/m$ ),

$\varepsilon_r$  a permissividade relativa do material da partícula,

$d_p$ , diâmetro da partícula ( $m$ )

$t$ , tempo de carregamento ( $s$ )

$\varepsilon_0$ , permissividade no espaço livre ( $F/m$ )

$J$ , densidade de corrente ( $A/m^2$ )

A máxima carga que uma partícula pode ser carregada, atingindo assim seu limite de saturação, ou limite de Pauthenier, é dada pela equação 2.3.

$$q_{sat} = \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \pi \varepsilon_0 d_p^2 |\vec{E}(\vec{r})| \quad (2.3)$$

Onde  $q_{sat}$  ( $C$ ) é a carga de saturação da partícula e depende do valor local do campo elétrico. Uma vez que as partículas normalmente não perdem cargas, as partículas podem transportar cargas que excedam o valor local da carga de saturação, trazendo consigo uma espécie

de memória das condições de carregamento que existiam ao longo de sua trajetória.

Pequenas partículas têm uma baixa carga de saturação, já que os íons do gás têm apenas uma pequena superfície para se depositarem. Partículas grandes acumulam mais cargas elétricas na sua superfície e, portanto, são mais fortemente afetadas pelo campo elétrico aplicado.

O processo de carregamento contínuo por campo não leva em consideração o carregamento de pequenas partículas, cujos diâmetros são inferiores a  $1\text{ }\mu\text{m}$ . Nestes casos a área da partícula perpendicular ao campo elétrico é tão pequena que a probabilidade de interceptação dos íons ao longo de sua trajetória é desprezada. O tipo de carregamento considerado nestes casos se dá a partir da energia cinética térmica, considera-se o efeito do carregamento contínuo por difusão cujo equacionamento será abordado a seguir.

### 2.3.2 Carregamento Contínuo por Difusão

O mecanismo de carregamento por difusão (térmico) depende das colisões entre as partículas e os íons, que têm movimentos aleatórios devido sua energia cinética térmica. A taxa de carregamento da partícula é determinada por probabilidade das colisões dos íons na superfície da partícula.

No caso de partículas pequenas (inferiores a de  $1\text{ }\mu\text{m}$  de diâmetro), maior parte das cargas acumuladas se dá por este mecanismo ao longo de toda a superfície da partícula. Ocorre mesmo na ausência de um campo elétrico, necessitando de um longo período para chegar ao limite de saturação da partícula.

A figura 19 representa o processo de carregamento térmico na ausência de campo elétrico. Neste caso, a distribuição dos íons é uniforme ao redor da superfície da partícula e cada elemento da área da superfície tem a mesma probabilidade de experimentar a colisão com um íon.

No processo de carregamento por difusão não há nenhuma propriedade análoga à taxa de saturação do processo de carregamento contínuo por campo, mas conforme (WHITE, 1963) pode ser modelada pela equação 2.4 .

$$q_d(t) = 8\varepsilon_0 \left( \frac{m_i k T}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\mu_i E}{d_p J e} \right) \quad (2.4)$$

$q_d(t)$ , carga da partícula ( $C$ ),



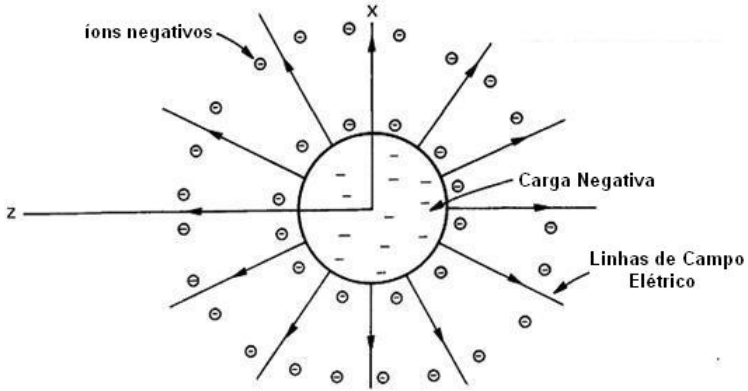


Figura 19 – Processo de carregamento por Difusão  
(MACDONALD, 1978)

$m_i$ , massa do íon ( $kg$ ),  
 $k$ , Constante de Boltzmann  $1,38.10^{-23}$  ( $J/K$ ),  
 $T$ , temperatura ( $K$ ),  
 $e$ , carga do elétron  $1,6.10^{-19}$  ( $C$ ),  
 $\mu_i$ , mobilidade do íon ( $V.m/s^2$ ),  
 $J$ , densidade iônica de corrente ( $A/m^2$ ).

Segundo (WHITE, 1963) a carga de saturação  $q_{fds}$  considerando também ambos os efeitos pode ser determinada a partir da equação 2.5.

$$q_{fds} = \left[ \left( 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \right)^2 + \left( \frac{1}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}} \right) \left( \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right) \right] \pi (d_p)^2 \varepsilon_0 E \quad (2.5)$$

$d_p$ , diâmetro da partícula ( $m$ );  
 $\lambda$ , caminho livre médio ( $m$ );  
 $E$ , Campo elétrico ( $V/m$ );  
 $\varepsilon_r$ , a permissividade relativa do material da partícula;  
 $\varepsilon_0$ , permissividade no espaço livre ( $F/m$ ).

Conforme o que foi apresentado, a quantidade de cargas aderidas as partículas dependerá do campo elétrico aplicado, da densidade de carga no meio e também do tempo em que a partícula é exposta ao carregamento. Uma forma de se determinar a carga instantânea,  $q_j$ , de uma partícula esférica pode ser obtida a partir da equação 2.6 (ZAMANY, 1992).

$$q_j = q_{fds} \cdot \frac{b_i \rho_i \tau}{b_i \rho_i \tau + 4\epsilon_0} \quad (2.6)$$

Onde,  $b_i$  é a mobilidade do gás,  $\rho_i$  a densidade iônica de cargas e  $\tau$  o tempo de residência.

A densidade média de carga das partículas no espaço pode ser determinada em diferentes pontos do PES a partir da equação 2.7.

$$\rho_p = \sum_{j=1}^{Npc} q_j \frac{C_j}{m_{pj}} \quad (2.7)$$

Onde  $C_j$  e  $m_{pj}$  são respectivamente a concentração ( $kg/m^3$ ) e a massa das partículas ( $kg$ ) e  $Npc$  o número de partículas.

A mobilidade média das partículas para diferentes diâmetros de partículas no PES pode ser determinada a partir da equação 2.8.

$$b_p = \sum_{j=1}^{Npc} \frac{q_j}{3\pi\mu d_{pj}} w_{cj} \quad (2.8)$$

Onde  $b_p$  é a mobilidade média das partículas,  $q_j$  a carga da partícula,  $w_{cj}$  peso do coeficiente da classe da partícula dependendo do seu diâmetro,  $\mu$  a viscosidade do gás e  $d_{pj}$  o diâmetro da partícula.

Os dois processos de carregamento descritos anteriormente, ilustram que há uma influência significativa do tamanho das partículas no funcionamento do precipitador. Além desta dependência relativa ao diâmetro da partícula, existem ainda outras características importantes que afetam o desempenho e que serão vistas a seguir.

### 2.3.3 Migração e Coleta das Partículas

Conforme apresentado na figura 2, migração e coleta são respectivamente as duas próximas etapas que sucedem o carregamento das partículas. Estas etapas impactam diretamente no desempenho do PES e definem alguns aspectos construtivos como é o caso da área

total das placas coletoras para garantir a eficiência especificada pelo fabricante do equipamento.

A velocidade de migração é definida como a velocidade na qual uma partícula carregada migra na direção do eletrodo de coleta. Existem diferentes variáveis que afetam esta velocidade, dentre estas estão: o tamanho da partícula, a intensidade do campo elétrico e a viscosidade do gás.

A equação 2.9 apresenta uma forma de se obter a velocidade de migração da partícula considerando apenas o mecanismo de carregamento por campo atuando na partícula (MIZUNO, 2000).

$$\omega_f = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\mu(\varepsilon_r + 2)} d_p E^2 \quad (2.9)$$

$\omega_f$ , velocidade de migração da partícula por campo (m/s);

$\mu$ , a viscosidade do gás (Pa.s);

$d_p$ , diâmetro da partícula (m);

$E$ , Intensidade do campo elétrico na partícula (V/m);

$\varepsilon_0$ , permissividade no espaço livre (F/m);

$\varepsilon_r$ , a permissividade relativa do material da partícula.

É possível também obter a velocidade de migração considerando somente a contribuição do carregamento por difusão, conforme a equação 2.10 (MIZUNO, 2000).

$$\omega_d = \frac{4\varepsilon_0 k}{\mu e} T E C_m \quad (2.10)$$

$C_m$  é o fator de correção de Cunningham dado por 2.11:

$$C_m = 1 + 2.54 \frac{\lambda}{d_p} + 0.8 \frac{\lambda}{d_p} e^{\frac{-0.55 d_p}{\lambda}} \quad (2.11)$$

$\omega_d$ , velocidade de migração da partícula por difusão (m/s);

$d_p$ , diâmetro da partícula (m);

$E$ , Intensidade do campo elétrico na partícula (V/m);

$\lambda$ , Caminho livre médio das moléculas do gás (m);

$\mu$ , viscosidade do gás (Pa.s);

$e$ , carga do elétron (C).

$k$ , Constante de Boltzmann  $1,38.10^{-23}$  (J/K);

$T$ , a temperatura (K).

No caso das moléculas do ar, em condições normais de temperatura e pressão, considera-se  $\lambda = 0,07 \mu m$ .

Outra equação comumente utilizada que considera ambos os efeitos de carregamento é dada a partir de 2.12 (EPA, 2012).

$$\omega = \frac{qEC_m}{6\pi r_p \mu} \quad (2.12)$$

$\omega$ , velocidade de migração da partícula próximo ao eletrodo de coleta (m/s);

$\mu$ , viscosidade do gás (Pa.s);

$q$ , carga da partícula (C);

$E$ , Intensidade do campo elétrico na partícula (V/m);

$r_p$ , raio da partícula (m);

$C_m$ , fator de correção de Cunningham.

Para as equações 2.9, 2.10 e 2.12 considera-se que todas as partículas migram com a mesma velocidade.

Fabricantes de PES também disponibilizam em seus manuais os valores das velocidades de migração das partículas, variando de acordo com o projeto do PES e da aplicação. Estes valores podem variar de 0.1 cm/s até 20 cm/s (EPA, 2012).

As partículas que migram no PES chegam até a placa coletora e ficam aderidas. A densidade de força eletrostática que mantém toda esta camada de cinzas na placa coletora pode ser calculada por meio da equação 2.13 (PENNEY; KLINGER, 1962).

$$F_c = \frac{1}{2\varepsilon_0} [E_l^2 - (\frac{J\rho_{ash}\varepsilon_r}{\varepsilon_0})^2] \quad (2.13)$$

$F_c$ , densidade de força de contato (N/m<sup>2</sup>);

$\rho_{ash}$ , resistividade da camada de cinzas ( $\Omega.m$ );

$E_l$ , intensidade do campo elétrico na camada de cinza (V/m);

$J$ , densidade de corrente (A/m<sup>2</sup>).

Esta força depende da quantidade de carga acumulada sobre a superfície da camada de cinzas e também da resistividade desta camada. No trabalho de (COOPERMAN, 1981) é apresentada a equação 2.14 que pode ser utilizada para se obter a densidade de corrente na placa coletora para uma grande faixa de aplicações de PES tipo duto.

$$J = \frac{\varepsilon_0 b}{2d^3} \left\{ \beta_j + \sqrt{\beta_j^2 + 24(V_w + V_0)(d.E_1)^3} \right\} \quad (2.14)$$

$J$ , Densidade de corrente na placa coletora (A/m<sup>2</sup>);

$b$ , Mobilidade do íon no ar ( $m^2/V.s$ );  
 $d$ , Distância entre as placas ( $m$ );  
 $V_w$ , Tensão aplicada no eletrodo de descarga ( $V$ );  
 $V_0$ , Tensão de início de corona ( $V$ );  
 $E_1$ , Campo Elétrico elétrico médio ( $V/m$ );  
 $s$ , Distância entre eletrodos de descarga. ( $m$ ).

A constante  $\beta_j$  pode ser obtida a partir da equação 2.15 (PARASRAM, 2001).

$$\beta_j = 9(V_w - V_0 + \frac{d.E_1}{2})^2 - 3(d.E_1)^2 \quad (2.15)$$

O campo elétrico  $E_1$  pode ser obtido a partir da equação 2.16.

$$E_1 = \frac{\pi V_0}{s.ln(r_{eff}/r_w)} \quad (2.16)$$

O Raio cilíndrico equivalente,  $r_{eff}$  pode ser obtido a partir da equação 2.17 para  $d \leq 2 s$ .

$$r_{eff} = \frac{2d}{\pi} \quad (2.17)$$

A equação da tensão de início do efeito corona  $V_0$  pode ser expressa a partir da equação 2.18.

$$V_0 = r_w.E_0.ln\left(\frac{r_{eff}}{r_w}\right) \quad (2.18)$$

Para obter o campo elétrico de ruptura do gás  $E_0$  utiliza-se a equação 2.19.

$$E_0 = f_r \left( K_1 \left( \frac{T_0 P}{P_0 T} + K_2 \sqrt{\frac{T_0 P}{P_0 T r_0}} \right) \right) \quad (2.19)$$

$r_w$ , Raio do eletrodo de descarga ( $m$ );  
 $r_{eff}$ , Raio do cilindro corona ( $m$ );  
 $E_0$ , Campo elétrico para ruptura do gás ( $V/m$ );  
 $f_r$ , Fator de rugosidade do cabo;  
 $K_1$ ,  $3,0.10^6$  ( $V/m$ );  
 $K_2$ ,  $0,03$  ( $m^{1/2}$ );  
 $T$ , Temperatura do gás ( $K$ );  
 $T_0$ , Temperatura de referência ( $298.15$   $K$ );  
 $P$ , Pressão do ar ( $Pa$ );  
 $P_0$ , Pressão de referência ( $101325$   $Pa$ ).

## 2.4 EFICIÊNCIA EM PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS

A eficiência do PES no processo de coleta dos particulados é o principal parâmetro num projeto de um precipitador. Uma forma de determiná-la quando o PES já se encontra em operação seria através de medições das concentrações dos particulados no gás. Isto pode ser feito utilizando a relação entre a concentração da entrada e saída do PES conforme a equação 2.20.

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}.100 \quad (2.20)$$

$\eta$ , Eficiência do precipitador;

$C_{in}$ , Concentração de partículas na entrada ( $mg/Nm^3$ );

$C_{out}$ , Concentração das partículas na saída ( $mg/Nm^3$ ).

Outra forma de se obter a eficiência do PES quando o mesmo ainda está na fase de projeto, seria por meio da relação de Deutsch-Anderson dada por 2.21.

$$\eta = 1 - e^{-\omega \frac{A}{Q}} \quad (2.21)$$

$\eta$ , eficiência do precipitador;

$\omega$ , velocidade de migração das partículas ( $m/s$ );

$A$ , área efetiva de coleta ( $m^2$ );

$Q$ , fluxo do gás no precipitador ( $m^3/s$ ).

Um problema apresentado na relação de Deutsch-Anderson é que ela considera que todas as partículas estão migrando com a mesma velocidade. Na literatura também são apresentadas outras equações baseadas na equação 2.21, como é o caso das equações 2.22 e 2.23 (NAVARRETE et al., 1997).

$$\eta = 1 - e^{(-\omega \frac{A}{Q})^k} \quad (2.22)$$

$$\eta = 1 - \left(1 + b \frac{A}{Q} \omega\right)^{-\frac{1}{b}} \quad (2.23)$$

$k$  e  $b$  são parâmetros que dependem das características do material, para cinzas de carvões  $k$  têm valor 0,5 e para  $b$  de 0,24.

Outros autores também apresentam equações que tomam como base algumas medições experimentais do precipitador como é o caso da

equação 2.24 (MIZUNO, 2000).

$$\eta = 1 - e^{\frac{-\omega LK}{U_g S}} \quad (2.24)$$

$\eta$ , eficiência do precipitador;  
 $\omega$ , velocidade de migração das partículas ( $m/s$ );  
 $L$ , comprimento da placa coletora ( $m$ );  
 $U_g$ , velocidade do gás ( $m/s$ );  
 $S$ , distância entre os eletrodos de descarga e coleta ( $m$ );  
 $K$ , fator de correção determinado por medição.

### 2.4.1 Fatores que Impactam na Eficiência

Existem diversas informações que estão relacionadas ao processo e à operação e que devem ser consideradas no dimensionamento de um PES. Com relação ao processo e que foram levadas em consideração ao modelo, pode-se citar: a distribuição do fluxo do gás e sólidos, a velocidade, a pressão, a temperatura, a viscosidade, a umidade, a concentração, a resistividade, a densidade, a distribuição granulométrica e a constante dielétrica.

Já as informações relativas à operação deve-se considerar o tipo de precipitador, seco ou úmido, a tensão de operação, a corrente e a área disponível para coleta. A seguir serão apresentadas algumas informações relacionadas a estes parâmetros e sua influência no desempenho do PES.

#### 2.4.1.1 Diâmetros das Partículas

Como pode ser observado na figura 20 e já evidenciado em algumas das equações apresentadas neste trabalho, um dos principais fatores que impactam na eficiência do PES está relacionado aos tamanhos das partículas.

Observa-se na figura 20 que há uma elevada eficiência na coleta das partículas acima de  $10 \mu m$ , devido ao efeito de carregamento por campo para partículas grandes. O efeito do carregamento por difusão é maior nas partículas menores do que  $0,1 \mu m$ . Percebe-se então que existe uma faixa entre  $0,1 \mu m$  e  $1 \mu m$  onde a eficiência da coleta é mais baixa.

Neste trabalho, dar-se-á maior ênfase às partículas maiores do que  $1 \mu m$  e sob influência de elevado campo elétrico externo, pois, estão

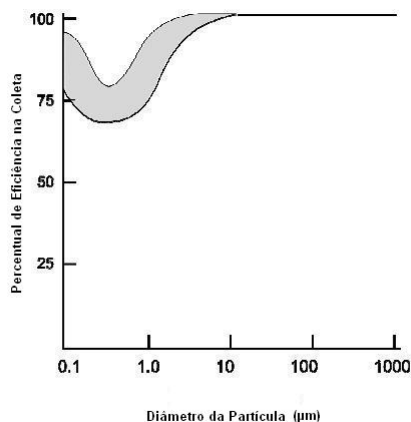


Figura 20 – Variação da eficiência em função do diâmetro da partícula (CROWDER; HARRISON; SMITH, 2000)

mais próximas das características das partículas escolhidas para os casos estudados nas simulações.

Existem diferentes metodologias para se obter a granulometria dos materiais coletados no processo de precipitação. Neste trabalho foi adotado para um dos estudos de casos o método de peneiramento para se obter o diâmetro médio das partículas (ABNT, 1993a). O equipamento utilizado está apresentado na figura 88 no anexo A.

Esta metodologia (ABNT, 1993a) utiliza diferentes níveis de peneiras para separação do material por variação do diâmetro das malhas de cada peneira. No anexo A são apresentados exemplos da distribuição de um dos casos estudados.

Outra forma de se obter o diâmetro das partículas é através de microscópio eletrônico, como o exemplo de uma amostra de cinza leve de um tipo de carvão do sul do Brasil apresentado na figura 21.

#### 2.4.1.2 Resistividade das Partículas

Um importante parâmetro que deve ser considerado para dimensionar o PES é a resistividade elétrica das partículas. Estas partículas ficam aderidas e agrupadas na placa coletora formando uma camada de pó que é removida ao longo do tempo. A resistividade elétrica tem



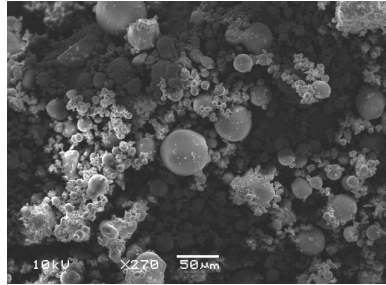


Figura 21 – Micrografia amostra de cinza leve  
(KERSTNER et al., 2010)

influência no período em que os batedores irão atuar para remover o material coletado e também na eficiência do PES.

Quando a resistividade é muito baixa, os elétrons são conduzidos muito rapidamente, e existe apenas uma pequena diferença de carga através da camada de pó.

Quando a resistividade é muito elevada, os elétrons têm dificuldade em se mover através da camada de pó e criam forças muito elevadas à medida que se acumulam sobre a superfície exterior da camada de poeira.

Valores muito altos e muito baixos de resistividade são prejudiciais para o desempenho do precipitador eletrostático. Precipitadores eletrostáticos funcionam melhor quando a resistividade da camada de poeira se encontra numa faixa moderada.

Alta resistividade é geralmente considerada como sendo igual ou superior a  $5.10^{10}$  Ohm.cm. Baixa resistividade é geralmente considerada como sendo igual ou inferior a  $5.10^8$  Ohm.cm. A região entre  $5.10^8$  e  $5.10^{10}$  Ohm.cm seria a faixa moderada ou preferencial.

Um resumo a respeito das faixas de resistividade é apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Faixas de resistividade (EPA, 2012)

Faixa	Resistividade ( $\Omega$ .cm)
Baixa	$\rho < 5.10^8$
Moderada	$5.10^8 < \rho < 5.10^{10}$
Alta	$\rho > 5.10^{10}$

A composição química da cinza coletada também é um importante indicador para se prever o quão eficiente será o processo de captura das partículas. Um exemplo da composição química é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 – Resumo da análise química de cinza leve de carvão do sul do Brasil

Componente	Percentual
$\text{Al}_2\text{O}_3$	23,8
$\text{SiO}_2$	62,5
$\text{K}_2\text{O}$	2,72
$\text{CaO}$	1,37
$\text{TiO}_2$	1,23
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,27
Outros	3,11

No caso da composição da cinza apresentada na tabela 2 percebe-se que dois componentes destacam-se: a sílica  $\text{SiO}_2$  e depois a alumina  $\text{Al}_2\text{O}_3$  totalizando juntos 86,3 % do total da amostra.

A sílica  $\text{SiO}_2$  é bastante utilizada na produção de vidros e cerâmicas e é um dos óxidos mais abundantes na superfície terrestre, apresentando bons valores de isolamento elétrica. Sua resistividade elétrica varia entre valores de  $10^{17}$  e  $10^{21}$  Ohm.cm.

A alumina é um composto químico bastante utilizado em cerâmicas por apresentar boas características mecânicas e elétricas. Este material é altamente estável e é aplicado principalmente na produção de vidros, rolos cerâmicos, isoladores elétricos, entre outros. Os valores de resistividade da Alumina, a uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$  encontram-se em torno de  $10^{16}$  Ohm.cm.

Neste trabalho, como será apresentado adiante, fez-se a medição da resistividade elétrica das cinzas para um dos estudos de casos adotando como procedimento a norma (ASTM, 1999).

Durante o processo de limpeza do gás, para as camadas de pó de baixa resistividade, muitas das partículas são liberadas de volta para a corrente de gás na forma de partículas individuais ou pequenos aglomerados.

Se a resistividade é demasiadamente baixa as partículas são novamente dispersas no fluxo do gás, podendo haver um pico de emissão por um curto período de tempo. À medida que a resistividade aumenta numa escala moderada, a diferença de potencial aumenta através da ca-

mada de pó, e a massa de pó é desalojada como folhas coesas ou aglomerados que são grandes o suficiente para cair rapidamente e serem recolhidas.

Se a diferença de potencial através das camadas de pó se torna demasiadamente elevada (alta resistividade), pode ocorrer um número de efeitos adversos.

Em primeiro lugar, como a camada de poeira se acumula muito e ao acumular cargas elétricas na superfície, a diferença de potencial entre o eletrodo de descarga e a camada de poeira diminui, o campo eletrostático utilizado para conduzir as partículas através do gás até a camada de poeira é reduzido.

As velocidades de migração de partículas são as mais afetadas pela redução do campo. O impacto da variação da resistividade na velocidade de migração é ilustrada na Figura 22.

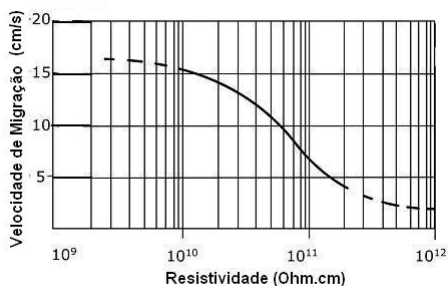


Figura 22 – Efeito da resistividade da camada de poeira na velocidade de migração

(CROWDER; HARRISON; SMITH, 2000)

Existem dois caminhos básicos que os elétrons podem percorrer ao passar pela camada de pó para atingir a superfície da placa coletora. Eles podem passar diretamente através de cada partícula até que atinjam a superfície do metal. Isto é chamado de condução granel e ocorre apenas quando há um ou mais constituintes nas partículas que podem conduzir eletricidade.

Por outro lado, os elétrons podem passar sobre as superfícies das várias partículas até que atinjam a superfície do metal. Isto é chamado de condução de superfície e ocorre quando compostos da fase de vapor podem conduzir eletricidade.

Um dos condutores elétricos mais comuns responsáveis pela condução em massa das partículas, são os materiais carbonosos. Se a concentração deste material é suficientemente elevada, os elétrons podem passar de partícula em partícula e alcançar a placa coletora.

Condução elétrica através dos óxidos inorgânicos e outros compostos que compreendem a maioria das partículas de cinzas a partir de fontes de combustão industrial e em outras fontes é também suficientemente rápida quando as temperaturas estão acima dos 200 °C indicado na Figura 23.

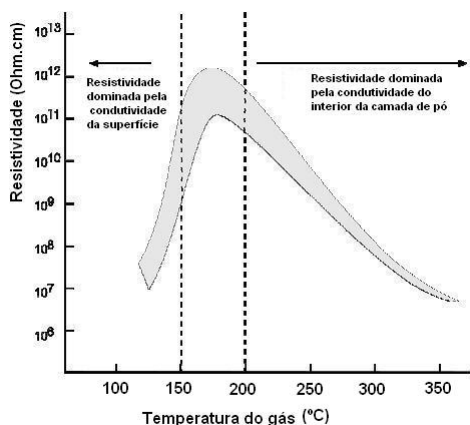


Figura 23 – Comportamento da resistividade em relação a temperatura (CROWDER; HARRISON; SMITH, 2000)

No lado da baixa temperatura da curva de resistividade típica, a resistividade pode diminuir drasticamente à medida que a temperatura do gás diminui. Isto é devido à adsorção eletricamente condutiva presente no vapor do gás.

Um dos compostos mais comuns responsáveis por condução de superfície é o ácido sulfúrico. Este componente adsorve muito facilmente à superfície das partículas.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados alguns componentes importantes do precipitador, como é o caso do sistema de alimentação, eletrodo de descarga, eletrodo de coleta (ou placa coletora).

Apresentou-se também o princípio de funcionamento e equações relacionadas aos principais fatores que influenciam o desempenho do precipitador e que serão adotados nos modelos, como é o caso do processo de carregamento das partículas, podendo este ser por difusão (efeito térmico), efeito evidenciado principalmente nas partículas sub-micrométricas. A outra forma evidenciada foi através do campo elétrico cuja influência é pronunciada em partículas maiores.

Finalmente, apresentou-se a importância de alguns parâmetros no dimensionamento do PES, como é o caso da velocidade de migração da partículas e da resistividade da camada de pó acumulada ao longo das placas coletoras e que podem influenciar consideravelmente na eficiência do processo.



### 3 MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE CARGAS (MSC)

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Como colocado na introdução deste documento, as forças elétricas (ou de origem elétrica) deverão ser incorporadas na modelagem. Para tanto, utilizaremos o MSC que nos permitirá determinar os potenciais e campos elétricos e então as forças.

Os métodos numéricos geralmente são baseados em equações diferenciais ou integrais. O método apresentado utiliza linhas de cargas fictícias, ou de simulação, como solução particular das equações de Poisson e Laplace.

A equação de Poisson pode ser escrita da forma apresentada na equação 3.1

$$\text{div}(-\varepsilon \text{grad}\phi) = \text{div}\vec{D} = \rho_v \quad (3.1)$$

Esta é a forma diferencial da equação de Maxwell, onde  $\vec{D}$  é a densidade do fluxo elétrico e  $\rho_v$  é a densidade volumétrica de carga. A equação 3.1 é independente de qualquer tipo de sistema de coordenadas. Esta equação pode ser integrada por meio da integral de volume resultando na equação 3.2

$$\int_V \text{div}\vec{D} dV = \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho_v dV = q_{total} \quad (3.2)$$

Aqui a integral de volume do divergente é transformada em uma integral na superfície  $S$ , e a integral de volume aplicada à densidade de carga pode ser facilmente identificada como a carga total  $q_{total}$ , envolvida pela superfície  $S$ .

A equação representa a Lei de Gauss. Esta lei dá exatamente a solução da equação de Poisson, e muitos métodos para cálculos de campos são baseados nesta lei, como é o caso dos métodos de diferenças finitas (FDM) e elementos finitos (FEM), diretamente baseados na equação sob a forma diferencial de Maxwell.

A resolução da equação diferencial, analítica ou numérica passa pela definição das condições de contorno e também do método adotado para se chegar à precisão desejada. Já a lei de Gauss é mais fácil de ser aplicada em casos onde existam algumas simetrias e condições de contorno aparentes.

Esta vantagem pode ser utilizada para se calcular o campo elétrico em situações onde a geometria é coaxial cilíndrica ou esférica, para as quais as integrais do lado esquerdo da equação 3.2 poderiam ser facilmente resolvidas devido às condições de simetria.

Diretamente relacionado com a aplicação da Lei de Gauss está o método das imagens com o qual pode-se resolver analiticamente alguns problemas importantes por meio de soluções pré-definidas, eliminando a necessidade de resolver as equações de Laplace e Poisson na forma diferencial.

O método de Simulação de Cargas (MSC) foi introduzido por (STEINBIGLER, 1969) como um método eficiente para cálculo de campo por computadores. Desde sua publicação (SINGER; STEINBIGLER; WEISS, 1974) tem sido reconhecido por ser muito competitivo e algumas vezes superior ao FEM ou FDM, no tratamento de campos bidimensionais e tridimensionais, em sistemas onde são necessárias grandes precisões dentro dos campos divergentes.

O MSC utiliza um conjunto de cargas elétricas fictícias para simular a distribuição real das cargas presentes na superfície de um condutor em estudo. Esse processo é chamado de discretização do problema, sendo as cargas pontuais o tipo mais básico e simples de serem utilizadas. Entretanto, existem outros arranjos bastante comuns e relatados na literatura, tais como segmentos finitos e anéis com densidade de carga uniforme.

As magnitudes destas cargas devem ser calculadas de tal forma que satisfaçam as condições de contorno do problema em todos os pontos. Os potenciais devidos a cada uma destas cargas fictícias devem satisfazer às equações de Poisson ou Laplace e apresentar solução única.

Devido a este método ser de natureza discreta, a simulação necessitará de um grande número de cargas para se chegar à solução satisfatória. O MSC também pode ser usado com sucesso em conjunto com outros métodos numéricos. A combinação pode ser uma alternativa muito interessante na busca por resultados mais precisos, já que, num mesmo problema, podem existir situações favoráveis para um ou para outro método.

Diversos trabalhos já foram realizados no sentido de se obter as densidades de cargas, densidade de corrente, distribuição do campo elétrico e as superfícies equipotenciais em precipitadores eletrostáticos (ELMOURSI; CASTLE, 1987, 1986).

Nos trabalhos citados, os resultados mostraram-se coerentes com as aplicações propostas, mostrando que este método pode ser aplicado a este tipo de equipamento.



### 3.2 PRINCÍPIO BÁSICO

O princípio básico de funcionamento do método é bastante simples de ser formulado. Se várias cargas discretas de qualquer tipo (por exemplo: ponto, linha, ou anel) estão presentes numa região, o potencial elétrico em um ponto "C" qualquer, pode ser encontrado através da soma dos potenciais resultantes das cargas individuais neste ponto, sendo que, nenhuma destas cargas esteja localizada no próprio ponto "C".

Suponha que  $Q_j$  represente algumas cargas individuais, e  $\phi_i$  o potencial em qualquer ponto dentro do espaço (independente do sistema de coordenadas utilizado). Através do princípio da superposição aplicado ao método, resulta a equação 3.3.

$$\phi_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \quad (3.3)$$

Na equação 3.3  $P_{ij}$  é o coeficiente de potencial obtido analiticamente por meio das equações de Laplace e Poisson e que devem estar adaptadas à geometria do problema. No anexo B encontram-se os coeficientes de potencial para cargas pontuais e também para linhas infinitas de cargas (MALIK, 1989).

Como exemplo de aplicação para cargas pontuais, na figura 24 estão representadas no vácuo  $\varepsilon_0$ , três cargas pontuais  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$ .

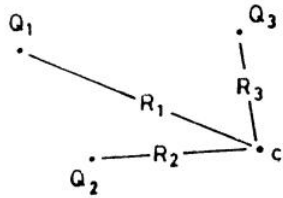


Figura 24 – Representação da distribuição de três cargas no espaço

O potencial no ponto  $C_i$  é dado pela equação 3.4.

$$\phi_i = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 R_1} + \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2} + \frac{Q_3}{4\pi\varepsilon_0 R_3} \quad (3.4)$$

A equação 3.4 pode ser escrita de outra forma como na equação

## 3.5.

$$\phi_i = P_{i1}Q_1 + P_{i2}Q_2 + P_{i3}Q_3 \quad (3.5)$$

Uma vez definidos os tipos de cargas e suas localizações, é possível relacionar o potencial  $\phi_i$  com a carga  $Q_j$ , quantitativamente em qualquer ponto.

No MSC, as cargas fictícias são alocadas fora do espaço onde a solução do campo elétrico é de interesse (ou dentro de qualquer superfície equipotencial, num ponto de um eletrodo de metal por exemplo) como representado na figura 25.

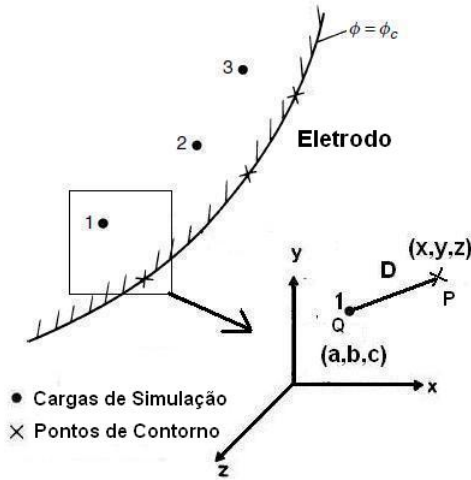


Figura 25 – Aplicação do MSC à um eletrodo

Tomando-se como base o sistema mostrado na Figura 25, que contém  $m$  cargas pontuais, são escolhidos  $n$  pontos na superfície do objeto em estudo, os chamados pontos de contorno. Então, o potencial em um destes pontos pode ser obtido pelo somatório dos potenciais gerados por cada carga individual, tomando-se como base o princípio da superposição. Quando este procedimento é aplicado em  $n$  pontos de contorno, leva também ao seguinte sistema de  $m$  equações lineares apresentado em 3.6.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

A partir das formulações apresentadas é possível obter os potenciais e os campos elétricos como será detalhado na sequência.

### 3.3 OBTENÇÃO DOS POTENCIAIS E CAMPOS ELÉTRICOS

Assumindo que existam  $n$  condutores com potenciais conhecidos, as cargas reais na superfície destes condutores são substituídas por  $m$  cargas fictícias colocadas dentro (ou fora) dos condutores, assim como apresentado no exemplo da figura 25.

No sentido de determinar a magnitude das cargas,  $n$  pontos (pontos de contorno) são selecionados nas superfícies dos condutores. É necessário que nestes pontos de contorno, o potencial resultante, obtido através do princípio da superposição para todas as cargas da simulação, seja igual ao potencial conhecido no condutor.

No método convencional, o número de pontos de contorno é igual ao número de cargas fictícias. Então as cargas podem ser determinadas através da equação:

$$[P]_{n,n}[Q]_n = [\phi]_n \quad (3.7)$$

$[P]_{n,n}$ , matriz dos coeficientes dos potenciais;  
 $[Q]_n$ , vetor coluna com os valores das cargas desconhecidas;  
 $[\phi]_n$ , vetor coluna com os valores dos potenciais.

Um dos fatores mais importantes e críticos do método está relacionado com os coeficientes de potencial ou a matriz  $[P]_{n,n}$ . Estes coeficientes definem várias questões de complexidade e uso de recursos computacionais. O coeficiente é função das distâncias envolvendo cargas de simulação e pontos de contorno, sendo que a sua formulação varia de acordo com os arranjos adotados no estudo.

No anexo B, nas figuras 101 e 102 são mostrados os coeficientes para cargas pontuais e linhas infinitas de cargas. A determinação dos coeficientes é feita a partir das equações de Poisson e Laplace, sendo dependente das condições de contorno iniciais, geometrias, permissivi-

dades e a presença de cargas no meio. Outras configurações de cargas e seus respectivos coeficientes de potencial podem ser encontradas em (MALIK, 1989; SINGER; STEINBIGLER; WEISS, 1974; INOUE, 1998).

Após resolver o sistema de equações 3.6 para determinar a magnitude das cargas na simulação, é necessário verificar se o conjunto de cargas calculadas produzem as reais condições de contorno em qualquer parte da superfície do eletrodo.

Deve ser enfatizado que somente n pontos de contorno discretos do eletrodo real devem ser utilizados para resolver a equação 3.6, e estes potenciais em qualquer outro ponto fora da condição de contorno devem ser diferentes do potencial no condutor.

A equação 3.3 é resolvida para um número de pontos localizados nos eletrodos onde os potenciais são conhecidos para determinar a precisão da simulação.

Se a simulação não atinge o critério de convergência, é necessário então, alterar alguns parâmetros como o número e as localizações das cargas de simulação, o número e as localizações dos pontos de contorno ou o tipo de carga de simulação utilizada para os cálculos.

Assim que o critério de convergência é atingido, os potenciais e campos de qualquer ponto fora dos eletrodos podem ser calculados. Uma vez que o potencial foi encontrado na equação 3.3, o campo elétrico para as diferentes componentes direcionais pode ser encontrado também por superposição. Por exemplo para um sistema de coordenadas cartesianas xy, o campo  $\vec{E}_i$  no ponto Ci é dado pela equação 3.8.

$$\begin{aligned}\vec{E}_i &= \left[ \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial x} Q_j \right] \vec{a}_x + \left[ \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_{ij}}{\partial y} Q_j \right] \vec{a}_y \\ &= \left[ \sum_{j=1}^n (f_{ij})_x Q_j \right] \vec{a}_x + \left[ \sum_{j=1}^n (f_{ij})_y Q_j \right] \vec{a}_y\end{aligned}\quad (3.8)$$

Na equação 3.8,  $\sum_{j=1}^n (f_{ij})_x Q_j$  é a componente do campo elétrico na direção x e o termo  $\sum_{j=1}^n (f_{ij})_y Q_j$  a da direção y. Em muitos casos, o campo eletrostático de interesse se encontra entre um sistema de condutores e um plano infinito com  $\phi_i = 0V$ . Este plano pode ser levado em consideração através da introdução de imagens de cargas.

A equação 3.8 apresentada para calcular a intensidade de campo é válida para meios com um único dielétrico. Para materiais com mais de um dielétrico, os cálculos são mais complexos quando comparados

com os métodos FDM e FEM. Observa-se também que a utilização do MSC para vários dielétricos é muito restrita. Tendo em vista as soluções apresentadas por outros métodos, apenas situações bastante simples acabam sendo tratadas por meio da simulação de cargas. Exemplos de aplicações utilizando o MSC para mais de um dielétrico pode ser vistos nos trabalhos de (BREBBIA; TELLES; WROBEL, 1984; WEISS, 1979).

### 3.4 CAMPOS ELÉTRICOS COM CARGAS ESPACIAIS

Por meio do método de simulação de cargas é também possível calcular os campos elétricos com cargas presentes no espaço. Existem duas possibilidades: distribuição de cargas conhecidas e desconhecidas.

O primeiro caso pode ser ilustrado por um exemplo envolvendo uma nuvem de íons se deslocando num campo elétrico. A nuvem de íons tem uma densidade de carga conhecida e pode ser aproximada por um ponto ou um anel de cargas. Por consequência, poucos anéis de cargas são necessários se comparado às cargas pontuais para simulação da nuvem de íons.

Também existem os casos nos quais a densidade de carga não é conhecida, sendo muito trabalhoso determinar tal valor. Este ponto não será abordado devido ao contexto do trabalho, que visa apenas aplicar valores de densidades de cargas já conhecidas ou estimadas.

Para o caso da nuvem de íons se deslocando, o cálculo é dependente do tempo, em cada passo são computadas as grandezas elétricas incluindo a contribuição das cargas no espaço e estas são transladadas de acordo com a amplitude e direção do campo elétrico. Os pontos em que as cargas se depositarão e o eletrodo dependerão dos tipos de cargas presentes na nuvem de íons (cátions ou ânions) e da polaridade do eletrodo, que deverá ser oposta à carga.

Estes procedimentos de cálculo continuam até que os íons atinjam o eletrodo oposto. Os potenciais nos pontos de contorno resultam na equação 3.9.

$$[P].[Q] + [P_s].[Q_s] = [\phi] \quad (3.9)$$

Como  $[P_s]$  e  $[Q_s]$  são conhecidos devido à densidade de cargas se deslocando no espaço ser conhecida, estes termos podem ser multiplicados e trazidos para o lado direito da equação 3.9 e subtraídos dos potenciais  $[\phi]$ . Desta forma o lado direito da equação torna-se um vetor resultado na equação 3.10.

$$[P].[Q] = [\phi] - [P_s].[Q_s] \quad (3.10)$$

O cálculo para obtenção das cargas de simulação é feito por meio da equação 3.10, a forma de calcular é mesma adotada para os casos sem a presença de cargas no espaço. O potencial para qualquer ponto no espaço é calculado pela equação 3.11.

$$\phi = \sum_{j=1}^n P_k.Q_k + \sum_{j=1}^{n_s} P_{sk}.Q_{sk} \quad (3.11)$$

Onde  $n_s$  representa o número de cargas no espaço,  $n$  o número de pontos de contorno e de cargas as quais simulam os eletrodos. A intensidade de campo é calculada de forma correspondente.

### 3.5 PRECISÃO DO MÉTODO

No geral, os potenciais e os coeficientes dos campos de cargas pontuais e linhas de cargas são dados por simples expressões analíticas que necessitam um mínimo de tempo computacional. Para cargas mais complexas, os potenciais e coeficientes dos campos podem ser obtidos numericamente.

Baseado no exemplo da figura 25, há alguns pontos que impactam na precisão do MSC e devem ser destacados. O primeiro é a escolha adequada da localização das cargas de simulação e dos pontos de contorno. O outro, refere-se ao número ou a densidade de pontos adotada para discretizar o problema em estudo, refletindo assim, no tempo de processamento computacional.

Considerando um sistema que utiliza cargas pontuais, de modo geral, aumentar a quantidade das cargas e de pontos de contorno eleva a precisão dos resultados. Porém, existe um limite no qual este aumento já não se reflete em melhorias. A partir deste momento, apenas o tamanho das matrizes e o tempo de simulação se ampliam desnecessariamente.

Não existe uma regra específica, mas a distância relativa entre cargas e pontos de contorno não pode ser muito pequena, pois o sistema de equações não fica bem condicionado. Quando o número de cargas e o número de pontos é muito grande, possivelmente eles ficarão muito próximos uns dos outros.

Esse fato leva a um sério problema na construção das matrizes

de potencial, visto que poderão existir várias linhas ou colunas iguais ou muito parecidas. Quando isso acontece, a precisão do método sofre alterações significativas. Por isso, a escolha adequada da posição, número das cargas de simulação e pontos de contorno é tão importante.

Diversos trabalhos nesta área utilizam diferentes ferramentas visando obter soluções cada vez mais próximas dos valores reais. Uma das técnicas utilizadas é a de determinar o posicionamento nas simulações por meio de algoritmos genéticos (NISHIMURA; NISHIMORI; ISHIHARA, 2000, 2001). Em contrapartida, também existem as soluções mais simples e baseadas apenas nas distâncias entre cargas e pontos consecutivos.

Um critério utilizado e determinado principalmente pela experiência, é a utilização do fator de atribuição  $f_a$ . Este fator relaciona a distância  $a_1$ , entre dois pontos de contorno consecutivos, à distância  $a_2$ , entre uma carga de simulação e seu ponto de contorno.

O cálculo do fator de atribuição é dado na equação 3.12 para duas disposições, em linha reta e em curva, conforme figura 26 (SINGER; STEINBIGLER; WEISS, 1974; PUNEKAR; KISHORE; SHASTRY, 2008).

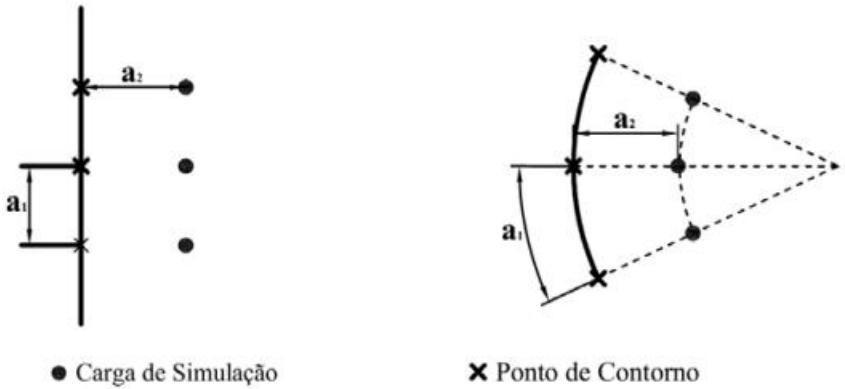


Figura 26 – Definição do fator de atribuição

$$f_a = \frac{a_2}{a_1} \quad (3.12)$$

$f_a$ , Fator de atribuição;

$a_1$ , Distância entre dois pontos de contorno consecutivos;

$a_2$ , Distância entre uma carga de simulação e seu ponto de con-

torno.

O valor calculado para  $f_a$  varia dentro de certa margem, dependendo muito da experiência e resultados alcançados pelos autores. Na maioria dos casos, o valor ideal está entre 1 e 2, sendo encontradas situações nas quais está entre 0,7 e 1,5 ou até mesmo fora desta faixa (MALIK, 1989).

Apesar de não existir um valor fixo e ideal para o espaçamento entre os pontos nem para sua posição, é possível estabelecer alguns critérios iniciais baseando-se na literatura. A partir disso, dependendo de cada aplicação, modificações devem ser efetuadas até serem encontrados resultados satisfatórios.

Recomenda-se a utilização de configurações com cargas mais complexas quando se deseja reduzir o tamanho do sistema de equações simultâneas, modelar campos tridimensionais ou sem simetria axial, calcular campos quando existem vários dielétricos, sistemas com eletrodos finos e com pontas.

Soluções analíticas para diversos problemas na área da eletrostática geralmente levam a respostas bastante precisas, apesar das simplificações muita vezes adotadas. Já o uso de métodos numéricos, invariavelmente, ocasiona erros nos resultados de simulações e cálculos.

Assim, todo um trabalho de pesquisa pode se tornar inviável ou não convergir para os valores corretos caso não ocorra uma análise dos erros inerentes ao processo.

O Método de Simulação de Cargas possui diversos parâmetros que alteram a precisão dos resultados, por isso é necessário um estudo para identificação e tratamento das falhas. Como já foi comentado, é possível realizar uma análise de erros a partir dos valores já calculados para as cargas de simulação. Para isto, uma das formas é comparar os valores de potencial obtidos a partir destas cargas com aqueles já conhecidos das condições de contorno do problema, as diferenças entre estes valores fornecem uma estimativa da precisão alcançada.

Se o erro encontrado possuir valor muito pequeno, o potencial na superfície dos condutores estará correto, assim como em qualquer outro ponto em estudo. De modo geral, os valores calculados para potencial elétrico são mais confiáveis do que os de campo elétrico (SINGER; STEINBIGLER; WEISS, 1974).

Os erros encontrados em cada ponto podem ser avaliados de três maneiras, aplicáveis em diferentes situações. As duas primeiras consistem em determinar a média aritmética e a média quadrática dos erros em diferentes pontos, sendo o resultado ideal o mais próximo de zero. A terceira maneira é avaliar o máximo erro em cada ponto.



Dependendo do valor o campo elétrico poderá sofrer muitas alterações e os resultados não convergirem para o valor real.

O campo elétrico é dado pelo gradiente do potencial. Assim, variações no valor do potencial afetarão significativamente o valor do campo elétrico. Isso é muito comum em simulações envolvendo cantos ou pontas arredondadas com raios muito pequenos.

Nas regiões onde existem superfícies equipotenciais é possível determinar a precisão da simulação baseando-se no ângulo entre o vetor campo elétrico e a superfície equipotencial, idealmente este ângulo deve ser igual a  $90^\circ$ . A variação angular entre o valor ideal e o simulado indica o erro de modo mais eficaz que a análise baseada apenas na diferença entre os potenciais.

Para o cálculo de erro utilizando capacitâncias, pode-se obter o valor como uma função do número de cargas na simulação. Para que a simulação seja precisa, a capacitância deve ser independente do número de cargas de simulação (MALIK, 1989).

Alternativas para verificar a precisão do MSC são a aplicação de outros métodos numéricos, soluções analíticas e medições experimentais, quando possível.

Independentemente do método de análise, o sucesso das simulações baseia-se em efetuar modificações de parâmetros até que seja encontrada uma precisão aceitável.

### 3.6 DETERMINAÇÃO DOS POTENCIAIS E CAMPOS ELÉTRICOS ATRAVÉS DO MSC

Para criação do modelo numérico foram estabelecidos alguns critérios iniciais e que definiram os casos mais adequados para aplicabilidade das simulações.

Como já foi visto anteriormente, o sucesso do MSC está baseado na escolha correta do tipo de carga de simulação, sempre de acordo com a geometria dos objetos ou regiões sob análise e levando em consideração os aspectos computacionais.

Adotaram-se inicialmente nas aplicações propostas dois arranjos: a carga pontual e a linha infinita de cargas. Foram selecionadas estas duas configurações porque, a partir delas, podem ser modeladas inúmeras aplicações onde se deseja conhecer o campo elétrico.

Outro fator importante foi a definição do sistema de coordenadas. Devido a facilidade de implementação computacional, posicionamento de pontos nos planos, o sistema retangular foi adotado

como padrão. Os exemplos apresentados neste capítulo que são utilizados para validar o código desenvolvido para o MSC estão em duas dimensões. Para que fosse possível simular os PES em três dimensões, algumas considerações foram adotadas, o detalhamento do que foi adotado será detalhado nos estudos de casos apresentados no capítulo 6.

A última consideração diz respeito à permissividade elétrica dos materiais envolvidos nas simulações. Todos os domínios estudados foram considerados homogêneos, ou seja, com a mesma permissividade elétrica, sendo o valor padrão o do vácuo.

O modelo desenvolvido em Matlab e também para Octave foi estruturado de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 27, que mostra as principais etapas de funcionamento do software. O fluxograma 27 mostra apenas a sequência e não destaca todas as condições impostas ao processo.

A execução do programa está condicionada à presença ou não de cargas livres no meio. Caso elas estejam presentes, o software executa os cálculos para o tempo especificado de simulação. Isso porque as cargas livres movem-se sob influência do campo elétrico e a cada novo passo de tempo seus posicionamentos são diferentes. A definição do tempo de simulação e o passo adotado determinarão o esforço computacional necessário para se obter os resultados.

Já nos casos em que não há presença de cargas livres no meio, o código é executado apenas uma vez.

A seguir são apresentados alguns resultados obtidos a partir das simulações utilizadas para validação do código desenvolvido para o MSC, considerando ou não, a presença de cargas no meio.

### 3.6.1 Cascas Cilíndricas Carregadas

Os resultados das simulações apresentadas na sequência foram obtidos a partir do livro de (KUFFEL; ZAENGL; KUFFEL, 2000) e apresentaram-se coerentes com o livro citado. Este exemplo bastante simples, mostra como alguns fatores podem impactar significativamente nas simulações.

Os eletrodos são formados por duas cascas cilíndricas carregadas com potenciais iguais em módulo, mas com sinais opostos. Duas cargas pontuais e dois pontos de contorno por esfera são utilizados para discretização do sistema.

A figura 28 apresenta o arranjo que foi simulado, sendo a tensão aplicada no eletrodo superior igual a 1 p.u. e no inferior igual a -1 p.u.

A simulação foi efetuada para duas condições diferentes, mantendo-

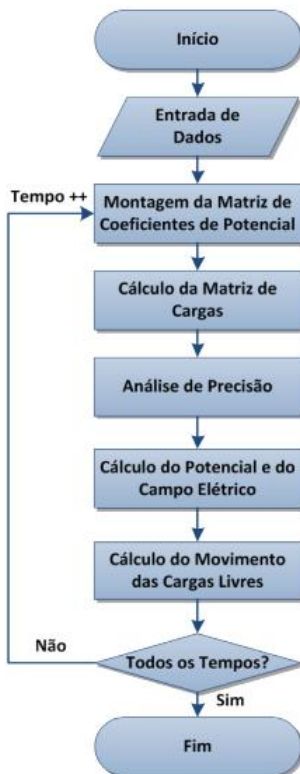


Figura 27 – Fluxograma implementado para o MSC  
(VALERIANO; TAVARES, 2012)

se todas as cargas sobre o eixo x e alterando-se somente o posicionamento vertical das cargas de simulação. Passando a ordenada da carga "A" de 1,1 para 1,25; "B" de 0,9 para 0,75; "C" de -0,9 para -0,75 e finalmente a carga "D" de -1,1 para -1,25 conforme dimensões apresentadas na figura 28. Os resultados podem ser observados nas figuras 29 e 30.

Observa-se na figura 30 que as linhas equipotenciais sofrem um achatamento em direção ao centro distorcendo as equipotenciais gerando assim um erro, mostrando a sensibilidade do método com relação ao posicionamento das cargas.

Uma análise de erro é apresentada na figura 31 indicando a diferença em módulo entre o valor do potencial calculado e o valor ideal, nos pontos de teste inseridos na figura 28.

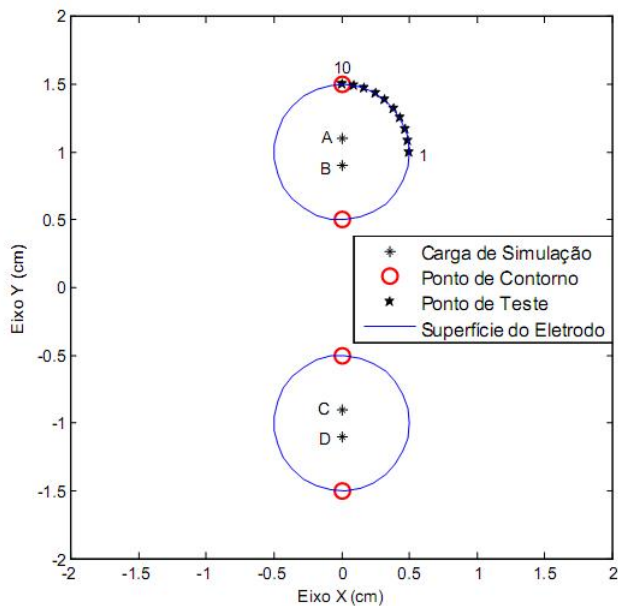


Figura 28 – Arranjo de duas cascas cilíndricas com polaridades opostas

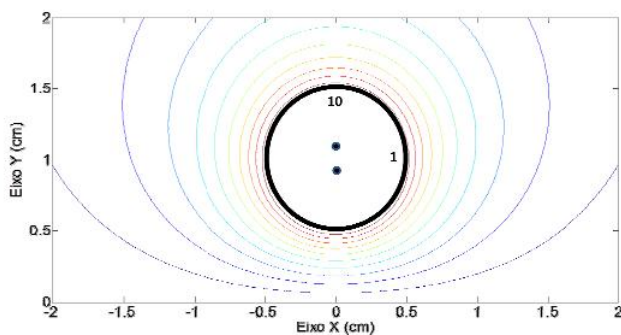


Figura 29 – Distribuição das equipotenciais para a primeira simulação

Na primeira condição, na qual as cargas estavam mais próximas, nota-se que os erros foram pequenos, sendo a maior diferença encontrada no ponto de teste número 1, ficando em torno de cinco por cento.

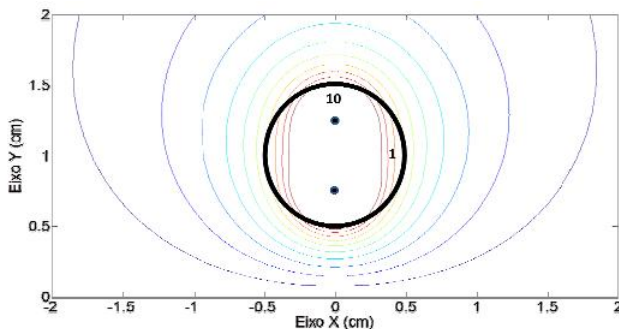


Figura 30 – Distribuição das equipotenciais para a segunda simulação

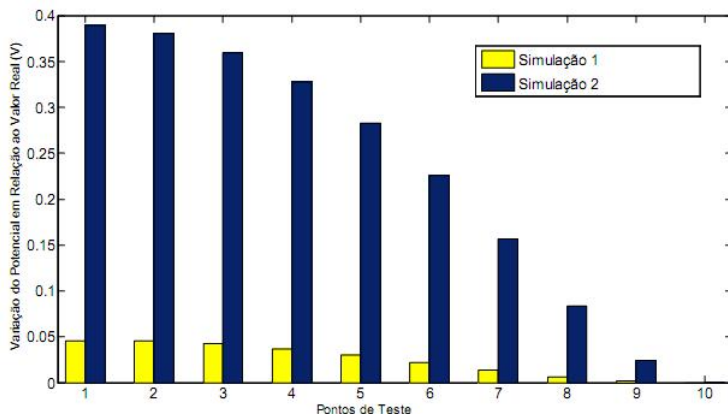


Figura 31 – Valores de erro em função dos pontos de teste

Na segunda condição, com as cargas mais afastadas, o maior erro encontrado também foi no ponto de teste número 1, sendo igual a 39 %. Esse ponto fica localizado exatamente na região achatada do potencial elétrico na figura 30, sendo um valor de erro muito acima do aceitável.

Com relação ao ponto de teste número 10, tanto na primeira, quanto na segunda simulação, o nível de erros foi praticamente igual a zero. Conforme já foi comentado no decorrer do texto, isso era esperado, já que ele fica localizado exatamente sobre um ponto de contorno do eletrodo.

Nestes casos estudados não foram adotados valores para o fator

de atribuição, porém em situações mais complexas, que contemplam várias cargas de simulação, seu posicionamento inicial deve seguir a metodologia do fator de atribuição ou através da utilização de técnicas de otimização, como por exemplo algoritmos genéticos (NISHIMURA; NISHIMORI; ISHIHARA, 2000, 2001).

### 3.6.2 Precipitador tipo placa fio

Outro exemplo simulado a partir do código desenvolvido para o MSC foi o caso descrito por (ELMOURSI; CASTLE, 1987) cujo modelo é apresentado na figura 32.

As principais características deste PES são: o potencial no eletrodo de descarga de 5 kV e o potencial nas placas coletoras igual a 0 V. A origem do sistema de coordenadas foi estabelecida no ponto O. Com relação às dimensões, ambos os segmentos OA e OB possuem comprimento igual a 38 mm, enquanto o raio R do eletrodo central mede 0,825mm.

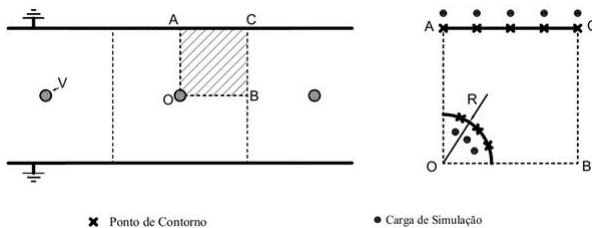


Figura 32 – Precipitador Placa Fio  
(ELMOURSI; CASTLE, 1987)

A região hachurada da figura 32 pode ser vista discretizada como mostra a figura 33. Onde são mostrados os pontos de contorno e também as cargas utilizadas para a simulação.

O arranjo de cargas adotado foi o de linhas infinitas, visto que se adéqua melhor à geometria do problema. Num único quadrante do eletrodo central foram utilizadas 8 cargas fictícias e 8 pontos de contorno. Já na placa superior, foram colocadas 31 cargas com igual número de pontos. Apesar da figura 33 apresentar a discretização de um quadrante, o mesmo procedimento é válido para os outros três. Na resolução do problema, com o cálculo da matriz de cargas, todos os

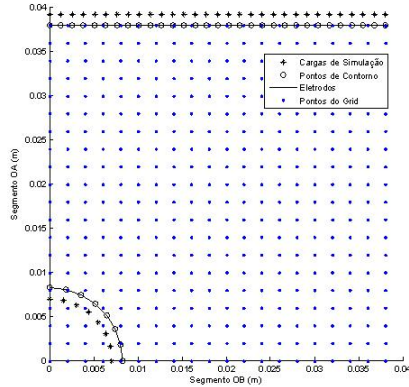


Figura 33 – Modelagem do Precipitador Placa Fio para o MSC

quadrantes foram levados em consideração. Assim, a influência das 152 cargas foi estudada.

O fator de atribuição, envolvendo as distâncias entre pontos de contorno e cargas de simulação, foi considerado unitário.

As figuras 34 e 35 apresentam os valores de campo elétrico e potencial obtidos a partir da simulação do MSC e da metodologia adotada por (ELMOURSI; CASTLE, 1987).

É possível observar a partir das figuras 34 e 35 que as diferenças entre os valores de campo elétrico e potencial obtidos por (ELMOURSI; CASTLE, 1987) e pelo código desenvolvido para o MSC não ultrapassam 0,5 %.

Na sequência são apresentadas outras simulações realizadas utilizando os mesmos procedimentos adotados para o precipitador descrito nesta seção.

### 3.6.3 Simulação com cargas livres

Este exemplo apresenta uma aplicação envolvendo cargas livres e sua movimentação no campo elétrico. Os dados se baseiam (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2000) e constitui o princípio básico do funcionamento de uma impressora jato de tinta.

A impressora possui uma cabeça de impressão que libera gotas de tinta de mesmo tamanho para os mesmos intervalos de tempo. As gotas são carregadas eletricamente e direcionadas para o centro de duas

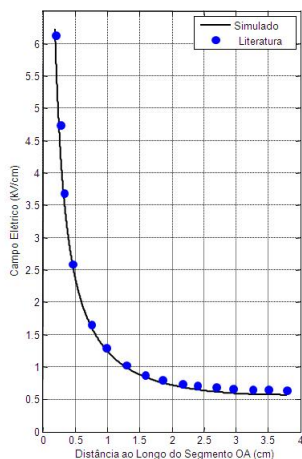


Figura 34 – Campo Elétrico simulado no MSC e por (ELMOURSI; CASTLE, 1987)

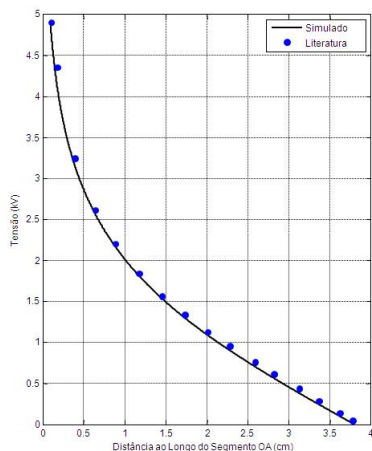


Figura 35 – Potencial elétrico simulado no MSC e por (ELMOURSI; CASTLE, 1987)

placas metálicas carregadas, chamadas de defletoras, onde existe um campo elétrico. A figura 36 apresenta as placas defletoras consideradas no exemplo.



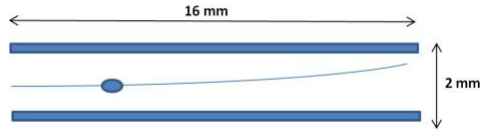


Figura 36 – Disposição das placas defletoras

As placas defletoras foram discretizadas como mostra a figura 37, utilizando-se 64 linhas infinitas de carga em cada uma delas. Na placa inferior é aplicado potencial nulo, enquanto a placa superior está com potencial igual a 2,8 kV fazendo com que o campo elétrico esteja orientado para baixo.

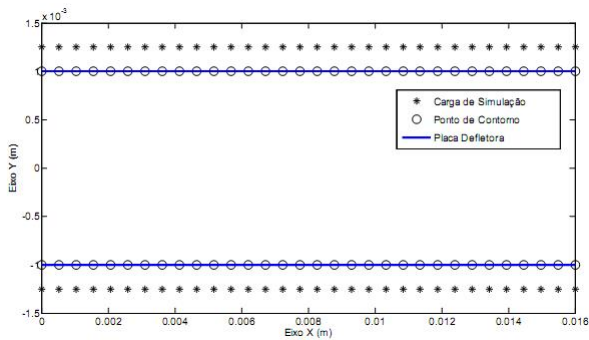


Figura 37 – Disposição das placas de defletoras

Adotou-se para esta simulação os seguintes dados de entrada: massa da gota igual a  $1,3 \cdot 10^{-10}$  kg, carga elétrica da gota  $1,5 \cdot 10^{-13}$  C, velocidade inicial horizontal de 18 m/s, velocidade inicial vertical nula, campo elétrico  $1,4 \cdot 10^6$  V/m.

Duas análises para o movimento da partícula foram efetuadas. A primeira considerou o equacionamento analítico e a segunda considerou a influência da gota no meio através da simulação pelo MSC desenvolvido. O deslocamento da gota de tinta no interior da placa é mostrado na figura 38 para as duas situações.

Nota-se que o campo acelera a partícula verticalmente desviando sua trajetória até ela ser expulsa das placas. Devido à proximidade entre a solução numérica e o valor ideal do campo, o deslocamento da

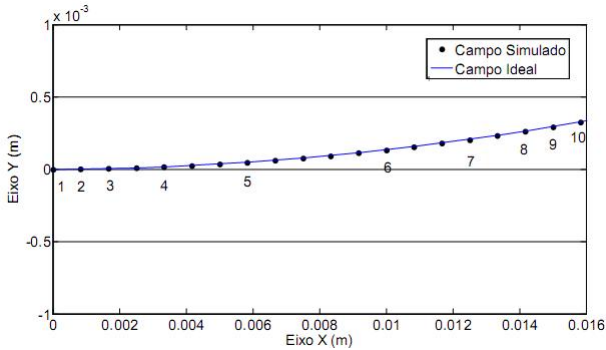


Figura 38 – Deslocamento da gota de tinta sob ação do campo elétrico

partícula foi praticamente o mesmo nos dois casos. Isso ocorre porque uma única carga livre não consegue alterar o valor do campo elétrico significativamente.

O programa desenvolvido permite verificar qual o valor do campo elétrico atuando sobre a gota de tinta em alguns pontos de sua trajetória. A partir destes dados é possível analisar a diferença entre o campo ideal, o campo simulado sem a influência da gota e o campo simulado com a influência da gota. A figura 39 apresenta os valores coletados nos 10 pontos destacados na figura 38 do trajeto da partícula.

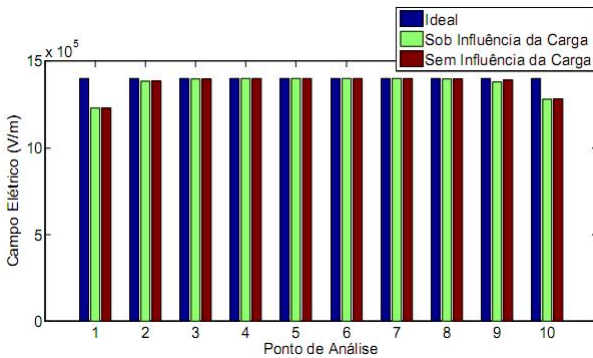


Figura 39 – Comparação entre o valor de campo ideal e o simulado pelo MSC

A análise da figura 39 mostra que o campo elétrico simulado difere do ideal nas extremidades, devido ao espraçamento das bordas. Além disso, os dados mostram que a influência da partícula sobre o campo é quase desprezível.

As situações nas quais as cargas livres modificam efetivamente o campo são aquelas que apresentam uma grande densidade de cargas, como será estudado futuramente no caso das partículas que são carregadas nos PES.

A partir dos exemplos expostos, foram abordados os aspectos mais relevantes e que tiveram maior influência nos resultados.

Na seção seguinte serão apresentados alguns pontos relevantes necessários para que seja possível inserir as forças de natureza elétrica no processo fluidodinâmico de um PES.

### 3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as principais equações envolvidas no método de simulação de cargas para obtenção dos potenciais e dos campos elétricos numa região de interesse.

Apresentou-se também algumas particularidades com relação às configurações onde existe a presença de cargas elétricas dispersas no espaço e também algumas recomendações a respeito de como quantificar os erros inerentes ao método.

As definições vistas neste capítulo serviram como base para confecção do código do programa que calcula a distribuição de campo na modelagem proposta. Algumas aplicações que validaram o programa desenvolvido também foram apresentadas neste capítulo.



## 4 FORMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA MULTIFÁSICA (MCFD)

### 4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresentará uma breve revisão a respeito da formulação para escoamento fluidodinâmico contínuo multifásico. Esta formulação típica segue as equações utilizadas pelo software MFX o qual será utilizado nas simulações para verificação das distribuições dos gases e sólidos nos modelos (PANNALA; SYAMLAL; BRIEN, 2009).

Nestas formulações constarão as principais equações envolvidas no processo de modelagem de PES, equações de conservação da massa, momento e energia para as duas fases consideradas.

Experimentos na área da fluidodinâmica multifásica em escala de laboratório podem trazer resultados muito diferentes daqueles medidos em escala real, ou em muitos casos, dependendo das particularidades do sistema real, esta redução de escala pode ser inviável em escala de laboratório. Devido a este fato, uma aproximação baseada na física, através de modelagem multifásica computacional fluido dinâmica (CFD) vem crescendo nas últimas três décadas e ganhando grande aceitação como ferramenta de projeto para dispositivos que utilizam nos seus processos meios como: gases, sólidos ou ambos.

Desenvolvimentos em sistemas múltifásicos CFD têm sido obtidos em aplicações práticas (GUENTHER; SYAMLAL, 2001), embora ainda existam vários desafios tanto em termos de novos teoremas, como também no tempo despendido na simulação numérica que devem ser superados.

Conforme apresentado na figura 40, existem no mínimo cinco aproximações utilizadas para descrever o fluxo gás-sólido, que fazem uma divisão entre o esforço do modelo e o custo computacional.

Numa ponta do espectro está o método de simulação direta computacional DNS, que resolve completamente o fluxo ao redor de partículas individuais através das equações de Navier-Stokes e traça o movimento das partícula resolvendo a equação de movimento de Newton (HAO et al., 2009). Este método é de baixo esforço na modelagem e de alto esforço computacional, em alguns casos em escala real, impraticável para a capacidade computacional atual.

Uma aproximação computacional menos onerosa utiliza o método Lattice-Boltzmann LBM, que resolve o fluxo ao redor das partículas

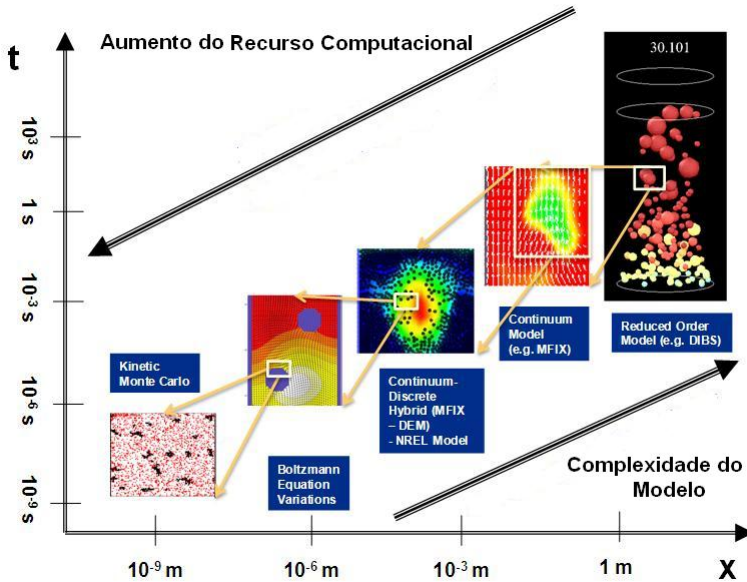


Figura 40 – Modelos utilizados para escoamentos multifásicos (PANNALA; SYAMLAL; BRIEN, 2009)

resolvendo as equações de Lattice-Boltzmann e traça o movimento da partícula resolvendo as equações de Newton do movimento (BEETSTRA; HOEF; KUIPERS, 2007a), (BEETSTRA; HOEF; KUIPERS, 2007b).

Muito do tempo computacional pode ser evitado não resolvendo o fluxo ao redor da partícula, como no caso do método de elementos discretos (DEM) (GERA; SYAMLAL; BRIEN, 2004); (GOLDSCHMIDT; BEETSTRA; KUIPERS, 2004), (TSUJI; KAWAGUCHI; TANAKA, 1993). Neste método, a informação do fluxo deve ser compensada através de relações constitutivas de arraste dos sólidos. É necessário também, calcular o contato entre todas as partículas (WILLIAMS; CONNOR, 1999). Este esforço computacional pode ser reduzido por detecção probabilística das colisões entre amostras de partículas ao invés de partículas individuais, como numa simulação direta por Monte Carlo (BIRD, 1994), (HERRMANN; LUDING, 1998), ou no conjunto, (MPPIC), (SNIDER, 2001), (SNIDER; ROURKE, 1998) ou finalmente desconsiderando os percursos individuais das partículas e considerando um movimento coletivo como num fluido.

Esta formulação considerando um movimento coletivo das partículas leva a um modelo gás-sólido contínuo, que é a formulação apresentada na sequência. Modelos contínuos são bem aceitos para fluídos. Nossa percepção diária de fluídos como a água e o ar é de que sejam fluídos contínuos, ao invés de uma coleção de moléculas.

Neste método as equações de movimento das partículas são calculadas considerando uma fase resultante sólida contínua. Esta fase é co-allocada na fase do fluído, resultando num modelo contínuo interpenetrante, também chamado de modelo de dois fluídos ou modelo Euleriano-Euleriano. Este tipo de formulação, com uma fase sólida resultante reduz consideravelmente o tempo de simulação.

A modelagem deste método exige um maior detalhamento se comparado ao DNS e DEM, suas relações constitutivas são desenvolvidas a partir de relações empíricas, analíticas e numéricas. Mesmo para modelos contínuos, simulações em escala industrial podem ter elevados tempos computacionais.

## 4.2 MODELO CONTÍNUO GÁS-SÓLIDOS

Os movimentos individuais de um conjunto de partículas podem ser conceitualmente obtidos através de valores médios e substituídos pelo movimento de um meio contínuo. Um exemplo que deixa mais claro este tipo de aproximação pode ser observado na figura 41.

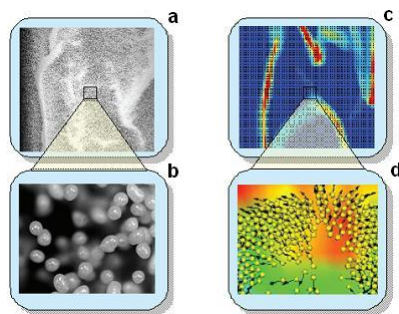


Figura 41 – Tipos de escoamentos multifásicos  
(PANNALA; SYAMLAL; BRIEN, 2009)

Na parte superior da figura 41, observa-se no lado esquerdo (a), a foto do caso real e a simulação (c) obtida a partir da teoria contínua

multifásica. Já na parte inferior da figura 41 (d), observa-se a representação para o caso discreto, onde há um maior detalhamento com relação a posição da partícula.

Isto leva a uma descrição matemática de uma fase contínua interpenetrante, uma fase gasosa contínua interpenetrante e uma ou mais fases sólidas contínuas. Fazendo-se isto, ganha-se computacionalmente simplificando a resolução dos processos físicos. Duas aproximações podem ser utilizadas para se chegar às equações de fluxos multifásicos: uma aproximação média e uma aproximação por mistura.

Na aproximação média, as equações são derivadas através do espaço, tempo, ou conjunto médio local, para balanços instantâneos para cada uma das fases (ANDERSON; JACKSON, 1967a), (ANDERSON; JACKSON, 1967b), (DREW, 1983), (ISHII; MISHIMA, 1984), (JACKSON, 2000), (JOSEPH et al., 1990), (ZHANG; PROSPERETTI, 1994a), (ZHANG; PROSPERETTI, 1994b).

Na aproximação pela teoria da mistura, as equações de fluxos multifásicos são postuladas e restrições nas relações constitutivas são derivadas a partir dos princípios gerais da mecânica contínua (ATKIN; CRAINE, 1976), (BEDFORD; DRUMHELLER, 1983), (BOWEN, 1976), (TRUESDELL, 1957).

Ambas aproximações resultam num conjunto de equações de balanço para massa, quantidade de movimento e energia. Estas equações, apesar da maneira como elas são obtidas, são incompletas, pois, necessitam ser fechadas com relações constitutivas como a relação de arrasto fluido-sólidos.

O ponto crucial do desenvolvimento do modelo multifásico é a formulação das relações constitutivas, as quais podem ser baseadas em técnicas partindo, por exemplo, de informações empíricas, que é o caso da equação de Ergun para arrasto (ERGUN, 1952).

Na sequência serão apresentados um resumo das principais equações e fundamentos teóricos utilizados para o desenvolvimento e aplicação dos modelos que serão apresentados neste trabalho.

#### 4.2.1 Teoria de Misturas

A teoria de misturas, como comumente é referida, tem origem no trabalho de Truesdell (1957). Truesdell associou movimento, densidade, força de campo, tensor de tensão parcial, energia interna parcial, fluxo de calor parcial, e densidade de fornecimento parcial de calor para cada um dos componentes da mistura.



Essas equações de balanços de massa, quantidade de movimento e energia são derivadas da termodinâmica irreversível, um ramo da mecânica denominado como termodinâmica racional. As equações de equilíbrio da teoria de mistura podem ser encontradas no trabalho de (JOSEPH et al., 1990). Para os componentes incompressíveis as equações correspondentes são 4.1 a 4.5.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_m U_{mi}) = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_g U_{gi}) = 0 \quad (4.2)$$

$$\rho_g \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g U_{gi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_g U_{gj} U_{gi}) \right] = m_g + \varepsilon_g \rho_g b_{gi} + \frac{\partial}{\partial x_i}(T_{g,ij}) \quad (4.3)$$

$$\rho_m \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_m U_{mi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_m U_{mj} U_{mi}) \right] = m_m + \varepsilon_m \rho_m b_{mi} + \frac{\partial}{\partial x_i}(T_{m,ij}) \quad (4.4)$$

$$m_m + m_g = \frac{\partial}{\partial x_i}(S_i) \quad (4.5)$$

O índice g refere-se ao gás e m refere-se ao sólido, então:

$\varepsilon_m$ , fração de volume dos sólidos ( $m^3$ );

$\varepsilon_g$ , fração de volume do gás ( $m^3$ );

$U_{mi}$ , Velocidade dos sólidos ( $m/s$ );

$U_{gi}$ , Velocidade do gás ( $m/s$ );

$\rho_m$ , Densidade do sólido ( $kg/m^3$ );

$\rho_g$ , Densidade do gás ( $kg/m^3$ );

$S_i$ , Tensor de interação de tensão ( $Pa$ );

$b_{gi}$ , Força de campo no gás ( $N/m^3$ );

$b_{mi}$ , Força de campo no sólido ( $N/m^3$ );

$T_g$ , Tensor de tensão no gás ( $Pa$ );

$T_m$ , Tensor de tensão no sólido ( $Pa$ );

$m_g$ , Massa do gás ( $kg$ );

$m_m$ , Massa do sólido ( $kg$ ).

O conjunto de equações 4.1 - 4.5 é a base da teoria de mistura. Estas equações têm que ser completadas com relações constitutivas para serem capazes de descrever o escoamento de misturas multifásicas.

### 4.2.2 Método das Médias

A outra maneira amplamente adotada para se chegar nas equações contínuas é a utilização de técnicas de ponderação (JACKSON, 2000). Duas técnicas de ponderação são utilizadas neste método, o conjunto das médias e a média do volume.

Em ambas as abordagens de média, o formalismo de contínuo interpenetrante requer variáveis de campo para quantificar as frações volumétricas por fase, ou, a fração do volume ocupado por uma média de cada fase.

Estas frações são indicadas por  $\varepsilon_g$  para a fase do gás (também conhecida como a fração de vazios) e para a fração da fase sólida  $\varepsilon_m$ . São utilizados também, como no caso da teoria de misturas, o índice  $g$  para a fase gasosa e  $m$  para cada uma das fases dos sólidos.

As frações de volumes são assumidas como funções contínuas no espaço e no tempo. Por definição, a soma das frações de volume de cada fase deve ser igual a um.

A técnica de cálculo do conjunto das médias têm sido amplamente utilizada para derivar duas equações de fluídos uma, referente a parte sólida e outra ao gás (DREW, 1983), (JOSEPH et al., 1990), (LUNDGREN, 1972), (SAFFMAN, 1971).

Nesta técnica de cálculo da média do conjunto, é necessário definir uma função indicadora. Então, pode-se chegar ao conjunto de equações para misturas multifásicas com constituintes incompressíveis (JOSEPH et al., 1990).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_g U_{gi}) = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_m U_{mi}) = 0 \quad (4.7)$$

$$\rho_g \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g U_{gi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_g U_{gj} U_{gi}) \right] = - \langle \delta(x) t \rangle + \varepsilon_g \rho_g b_{gi} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_g T_{g,ij}) \quad (4.8)$$

$$\rho_m \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_m U_{mi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_m U_{mj} U_{mi}) \right] = \langle \delta(x) t \rangle + \varepsilon_m \rho_m b_{mi} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_m T_{m,ij}) \quad (4.9)$$

As definições de todas as grandezas e unidades são idênticas às

introduzidas na abordagem da teoria de mistura com a introdução do termo de arrasto interfacial  $< \delta(x)t >$ .

Na abordagem de volume médio as variáveis de ponto são calculadas sobre uma região que é grande em comparação ao tamanho da partícula, mas, muito pequena comparada ao domínio de fluxo.

Isto envolve a suposição implícita de que existe uma clara separação de escalas entre a escala de partículas, a escala média e a escala do dispositivo (SAFFMAN, 1979).

Na prática, contudo, isto pode ser difícil de ser realizado na modelagem de fluxos mais complexos. Chega-se então numa média mista (uma combinação de média do volume com a média de conjunto), como apontado por (PROSPERETTI, 2007) e denominado como volume representativo elementar. Considerando esta particularidade é possível chegar às equações médias conforme (JACKSON, 1997):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_g U_{gi}) = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_m U_{mi}) = 0 \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} & \rho_g \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g U_{gi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_g U_{gj} U_{gi}) \right] = \\ & - \sum_m \int_{S_m} \tilde{T}_{g,ij}(y) n_j(y) g(|x-y|) dS_y + \varepsilon_g \rho_g b_{gi} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_g T_{g,ij}) \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} & \rho_m \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_m U_{mi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_m U_{mj} U_{mi}) \right] = \\ & \sum_m \int_{S_m} \tilde{T}_{g,ij}(y) n_j(y) g(|x-y|) dS_y + \varepsilon_m \rho_m b_{mi} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_m T_{m,ij}) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Onde  $g(|x-y|)$  representa uma função de ponderação entre a área total do sistema e o ponto de análise,  $\tilde{T}_{g,ij}$  representa o tensor de tensão eficaz do gás e  $T_{m,ij}$  representa o tensor de tensão médio do sólido, os demais seguem as mesmas definições e unidades já apresentadas.

Em ambas as equações de quantidade de movimento, o primeiro termo do lado direito representa o termo de interação de arraste, o segundo termo representa as forças de campo, e o último as tensões.

### 4.3 CONSERVAÇÃO DA MASSA

A conservação da massa ou a equação de continuidade para a fase gasosa é dada pela equação 4.14:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_g \rho_g U_{gi}) = \sum_{n=1}^{N_g} R_{gn} \quad (4.14)$$

O primeiro termo no lado esquerdo na equação 4.14 representa a taxa de acumulação de massa por unidade de volume, e o segundo termo é a taxa de fluxo de massa convectivo. O termo à direita quantifica a transferência de massa entre fases devido às reações químicas ou processos físicos, tais como a evaporação.

$R_{gn}$  é a taxa de geração de espécies na fase gasosa n do total de  $N_g$  espécies de fases gasosas. Existem M equações de continuidade da fase sólida, uma para cada fase de sólidos. Utilizando o índice m que vai de 1 até M para representar diferentes fases sólidas e usando o índice 0 para representar a fase do gás, a equação de continuidade de sólidos de fase é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_m \rho_m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_m \rho_m U_{mi}) = \sum_{n=1}^{N_g} R_{mn} \quad (4.15)$$

$R_{mn}$  é a taxa de geração de espécies n na fase sólida, as demais grandezas e unidades seguem também as apresentadas nas equações anteriores deste capítulo.

#### 4.3.1 Equação de estado

A equação de continuidade do fluido de fase é completada por uma equação de estado, como por exemplo a lei dos gases ideais onde para um fluido considerado incompressível é dada por 4.16.

$$\rho_g = \frac{P_g M_w}{RT_g} \quad (4.16)$$

$P_g$ , Pressão do gás (Pa);

$M_w$ , Peso Molecular (-);

$T_g$ , Temperatura do gás (K);

$R$ , Constante dos gases ideais, 8,31 J/Mol.K.

As densidades das fases dos sólidos são tipicamente consideradas

como uma constante. Se existem mudanças de densidade devido às reações químicas, uma equação de estado adicional é necessária para relacionar a densidade de sólidos para a sua composição química.

#### 4.4 CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

A equação 4.17 expressa o balanço do momento da fase gasosa e é expressa expandindo o tensor de tensão da fase gasosa na formulação média introduzida anteriormente:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g U_{gi}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon_g \rho_g U_{gj} U_{gi}) \right] = -\varepsilon_g \frac{\partial P_g}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{gij}}{\partial x_j} - \sum_{m=1}^M I_{gmi} + f_{gi} + \varepsilon_g \rho_g g_i \quad (4.17)$$

Onde  $\tau_{gij}$  é o tensor de tensão da fase gasosa,  $I_{gmi}$  é a transferência de momento entre o gás e os sólidos,  $f_{gi}$  é a força geral entre os corpos( exemplo, queda de pressão devido a meios porosos) e  $\varepsilon_g \rho_g g_i$  é a força devido à gravidade.

A equação da quantidade de movimento para a fase sólida é dada por 4.18

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_m \rho_m U_{mi}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon_m \rho_m U_{mj} U_{mi}) \right] = -\varepsilon_m \frac{\partial P_g}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{mij}}{\partial x_j} - \sum_{m=1}^M I_{mli} + \varepsilon_m \rho_m g_i \quad (4.18)$$

Nas equações de conservação da quantidade de movimento, 4.17 e 4.18, o termo  $I_{gm}$  leva em consideração a força de interação, ou transferência de momento, entre a fase gasosa e as fases sólidas. Os mecanismos de formulação das forças de interação foram revistos em detalhes por (MASSOUDI, 2003).

#### 4.5 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

As equações descritas até agora têm que ser completadas com as condições iniciais e de contorno para que possam ser resolvidas. As condições iniciais servem como um ponto de partida para as simulações, e, normalmente, as soluções após o transitório não deveriam depender da escolha das condições iniciais.

No entanto, um bom conjunto de condições iniciais muitas vezes

é necessário para se obter uma boa convergência. As soluções que satisfazem as equações governantes são sujeitas às condições de contorno, e estão vinculadas à precisão da solução.

Os valores iniciais de todas as variáveis de campo, pressão, temperatura e taxas das reações químicas devem ser especificadas para todo o domínio computacional.

Nas simulações dos processos fluidodinâmicos multifásicos, são necessárias condições de contorno. Basicamente utilizam-se três condições de contorno, na entrada do processo, na saída e por último nas paredes.

Uma condição de contorno na entrada deve ser especificada num local onde existe um fluxo uniforme. Todas as variáveis de campo precisam ser especificadas no contorno. Existem dois tipos possíveis, pressão constante ou fluxo de massa constante. A condição de fluxo de massa constante é mais comumente utilizada. É também necessário especificar uma condição de contorno na saída. Geralmente pressão constante sem nenhuma variação de velocidade é a condição mais comumente utilizada.

Condições de contorno para todas as variáveis têm de ser especificadas para as paredes. Uma vez que na maior parte dos dispositivos, as paredes desempenham um papel importante no desempenho global, muita atenção deve ser dada para a escolha desta condição de contorno.

É típico definir o componente de fase gasosa normal de velocidade igual à zero (não-penetração) e o gradiente da componente tangencial também zero (sem escorregamento).

Em conclusão, as condições de contorno são muito importantes para a integração exata das equações governantes.

## 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as principais equações envolvidas no processo fluidodinâmico multifásico contínuo e que estão relacionadas com a modelagem fluidodinâmica adotada neste trabalho para os PES.

Apresentou-se também as teorias e métodos, teoria de Misturas e Métodos das Médias, utilizados para que seja possível caracterizar o sistema como contínuo e a partir destes chegar às equações de conservação de massa e da quantidade de movimento sendo a última de principal interesse na formulação para inclusão da força devido ao campo elétrico no precipitador, devido ao processo de carregamento das partículas conforme descrito no capítulo 2.

Finalmente, apresentou-se a importância da especificação das condições iniciais e de contorno no funcionamento do método fluido-dinâmico abordado.





## 5 ACOPLAMENTO DO MCFD E O MSC

### 5.1 INTRODUÇÃO

Muitos modelos numéricos têm sido desenvolvidos para entender melhor os fenômenos envolvidos no deslocamento das partículas e dos gases no interior de precipitadores eletrostáticos. Isto tem sido feito para que se possa compreender ainda mais sobre este tipo de equipamento, e, conseqüentemente, melhorar os projetos e a eficiência na coleta de particulados (MACDONALD, 1978; ELMOURS; CASTLE, 1986; LAMI; MATTACHINI; GALLIMBERTI R TURRI, 1995; GALLIMBERTI, 1998; NEIMARLIJA; DEMIRDZIC; MUZAFERIJA, 2009; ADAMIAK, 2013).

A maior parte destes trabalhos citados anteriormente, utilizam PES em escala de laboratório e geralmente estudam áreas específicas do precipitador, como por exemplo, o carregamento das partículas, a determinação dos campos elétricos no interior do precipitador e a distribuição dos gases. Dependendo da aplicação e do tipo de método adotado a precisão e o custo computacional variam significativamente.

Neste trabalho, adotou-se o acoplamento entre os métodos MSC e MCFD como parte da metodologia para simular os processos de carregamento, migração e coleta das partículas em PES. Para que estes processos fossem simulados representando as condições reais, as interações entre os fenômenos elétricos e fluidodinâmicos foram consideradas em cada modelo.

Os cálculos das forças elétricas foram feitos a partir das informações dos campos elétricos e das cargas elétricas obtidos pelo MSC. Estas forças foram então adicionadas às forças já existentes (forças de arraste e gravitacional) no escoamento multifásico (gás e partículas) calculadas por meio do MCFD.

Utilizou-se para o desenvolvimento do trabalho, o software MFIX para simulação do MCFD. Este é um software livre bastante difundido no meio acadêmico para aplicações multifásicas (SYAMLAL; ROGERS; BRIEN, 1993). Foram feitas algumas alterações no código fonte para que fosse possível a utilização neste tipo de estudo, pois, é necessária a inclusão das forças sobre as partículas além daquelas já consideradas no software para o escoamento multifásico. Para isto, foi desenvolvido um código baseado no método de simulação de cargas que fornece ao software MFIX as informações de campo elétrico, potencial e cargas elétricas em cada ponto do precipitador.

Como parte do desenvolvimento da metodologia, o processo de

carregamento das partículas no PES também foi levado em consideração, e baseou-se nos processos de carregamento por campo e por difusão a partir das equações apresentadas no segundo capítulo deste trabalho.

A abordagem aqui apresentada tem como um dos principais benefícios a redução do tempo computacional, quando comparada a outros métodos que lidam com as partículas individualmente (métodos discretos ou Lagrangianos). Este ganho de tempo computacional fica ainda mais evidente em simulações de equipamentos ou sistemas de grande porte ou na escala industrial. Nestes casos, a quantidade de partículas dispersas no gás é extremamente elevada para que cada partícula seja tratada individualmente no meio. Precipitadores eletrostáticos utilizados em usinas termelétricas a carvão mineral são exemplos que podem ser utilizados em aplicações desta metodologia e que serão explorados neste trabalho.

Na sequência serão apresentadas as principais equações e considerações adotadas para o acoplamento dos métodos MSC e MCFD para simular o escoamento multifásico e a coleta de particulados em PES.

## 5.2 FUNCIONAMENTO DA METODOLOGIA

Inicialmente para um entendimento global do funcionamento da metodologia, na figura 42 é apresentado um diagrama representando o acoplamento dos métodos MSC e MCFD.

Conforme o diagrama da figura 42, para que seja possível a simulação de todo o processo, são necessários inicialmente, os dados de entrada para cada um dos métodos. No caso do MCFD são solicitados dados do processo fluidodinâmico, informações dos sólidos e gás, como por exemplo, as velocidades iniciais, as densidades, a temperatura, a viscosidade do gás e a concentração de partículas na entrada do PES.

Já para o MSC, são necessárias algumas informações relativas às grandezas elétricas e as características dos particulados como a tensão de operação, a densidade média de corrente nas placas coletoras, a resistividade e a permissividade das partículas.

Outra informação importante e também utilizada como dado de entrada para ambos os métodos, são as características das malhas. Na figura 43 são apresentados exemplos destas malhas que serão utilizadas nas simulações e são da região entre o eletrodo de descarga e as placas coletoras.

Para que a metodologia funcione adequadamente estas malhas

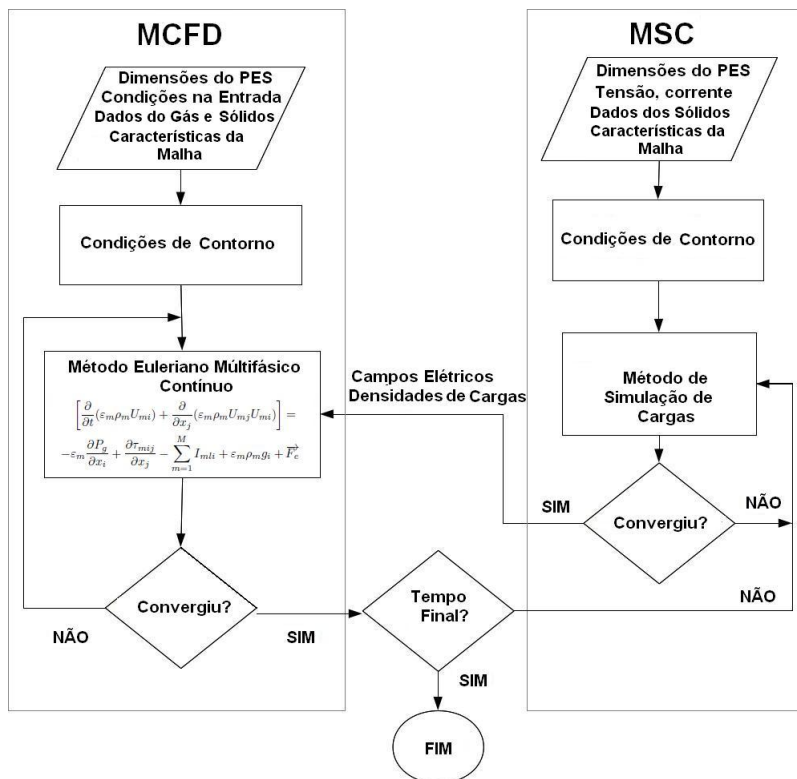


Figura 42 – Funcionamento da interação do MCFD e do MSC

devem estar geometricamente conectadas, fazendo com que os cálculos da contribuição de todas as forças sejam consideradas nos pontos de estudo das malhas do MCFD figura 43 (A) e do MSC figura 43 (B).

Na figura 43 (A) apresenta-se a malha gerada a partir do software MFIX que utiliza o método de volumes finitos para resolução numérica das equações do escoamento fluidodinâmico multifásico. Um exemplo de como cada célula é referenciada é apresentado na Figura 44. Nestas células os fluxos e velocidades são referenciados nas faces e as grandezas escalares nos centros (SYAMLAL; ROGERS; BRIEN, 1993).

As características geométricas dos PES escolhidos para os estudos de casos permitiram que algumas simplificações fossem adotadas para os modelos. A principal delas foi a de calcular as grandezas elétricas no MSC em um único plano, em duas dimensões (XY na figura

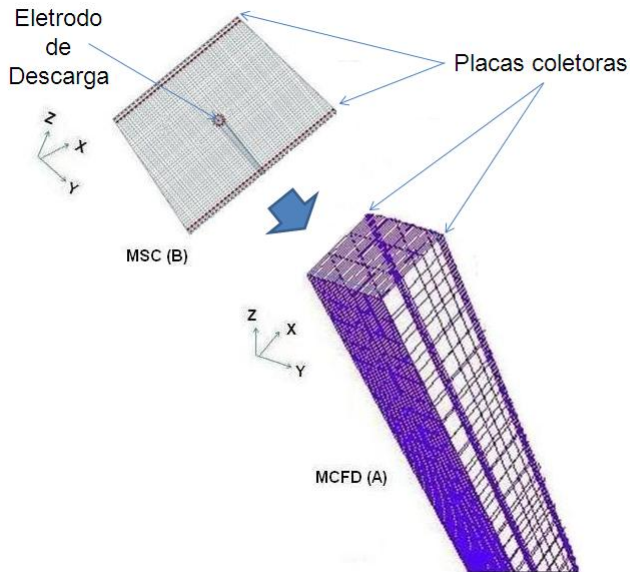


Figura 43 – Malhas do MCFD (A) e do MSC (B)

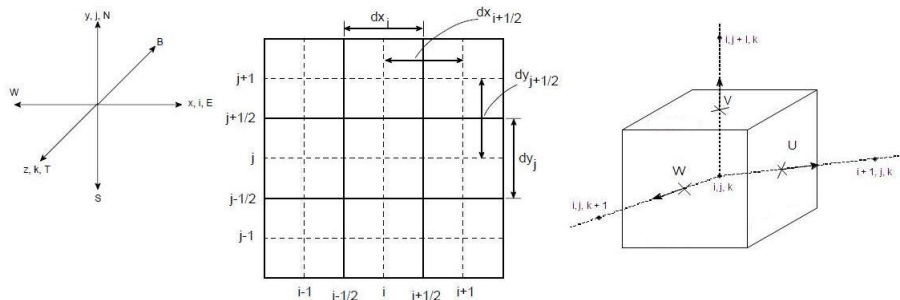


Figura 44 – Célula do MCFD (SYAMLAL; ROGERS; BRIEN, 1993)

43).

Já as malhas e células do MCFD foram simuladas utilizando três dimensões (XYZ na figura 43), o que possibilitou que a altura das placas coletoras fossem consideradas nos cálculos.

As equivalências dos pontos e células nas malhas dos dois métodos são feitas repetindo-se os valores das grandezas elétricas de um plano ao longo de um eixo. No exemplo da figura 43, todas as grandezas

elétricas obtidas para o plano XY da figura 43 (B) são consideradas constantes ao longo do eixo Z da figura 43 (A) nas células MCFD nas mesmas coordenadas XY. É possível então, calcular as contribuições das forças elétricas em cada célula MCFD utilizando os dados de um plano no MSC. Com isto, as dimensões das matrizes do MSC e o esforço computacional são reduzidos.

É necessário então que cada célula da Figura 44 esteja referenciada adequadamente na malha de pontos do MSC. Isto é executado na metodologia por meio de um código que referencia estes pontos em ambas as malhas, baseando-se nas informações dos tamanhos das células.

Os principais passos executados pelo código para localizar os pontos equivalentes entre as duas malhas são:

- 1 - Obtém-se os dados da matriz com a localização de cada ponto da malha do MSC [ $P_{MSC}(x, y)$ ] e das células MCFD [ $P_{MCFD}(x, y, z)$ ];
- 2 - A partir das coordenadas do ponto localizado no centro da face de uma célula  $P_{centroface}(x, y)$  (face do plano xy na figura 43 (A)), busca-se o ponto  $P_{equivalente}(x, y)$  mais próximo de  $P_{centroface}(x, y)$  na malha do MSC (figura 43 (B));
- 3 - Considera-se então que em todas as células que apresentam o mesmo  $P_{centroface}(x, y)$  os valores das grandezas elétricas calculadas no MSC em  $P_{equivalente}(x, y)$  são constantes ao longo do eixo z na figura 43 (B).

A cada passo de tempo são calculados os deslocamentos do gás e das partículas no MCFD. A inclusão das contribuições das forças elétricas são feitas no centro de cada célula MCFD e considera-se que o campo elétrico é constante ao longo do eixo z (figura 43).

Adota-se também que todas as faces das células MCFD são retangulares ou quadradas, e apresentam as mesmas dimensões na direção do eixo perpendicular ao plano considerado (eixo z na figura 43).

Adota-se como critério de convergência no MSC, a comparação entre os valores dos potenciais conhecidos nos eletrodos de descarga e placas coletoras com aqueles calculados a partir do MSC nestes mesmos pontos. Estabelece-se então uma tolerância ou erro máximo admissível de 5% como critério de convergência. Já para o MCFD, isto é feito diretamente no MFIX através da verificação das soluções encontradas, se estas satisfazem as equações de balanço de energia.

Finalmente, definidos os dados de entrada, as características das malhas, as condições de contorno e os critérios de convergência, passa-se então ao processo de obtenção das grandezas elétricas e fluidodinâmicas

considerando o acoplamento dos métodos. Um detalhamento das principais etapas executadas para adequação à metodologia e os respectivos equacionamentos envolvidos serão apresentados na sequência.

### 5.3 CARREGAMENTO DAS PARTÍCULAS

Conforme a Figura 2 apresentada no início da fundamentação teórica deste trabalho, o carregamento das partículas é um dos importantes processos que devem ser considerados na modelagem do funcionamento de um PES. As descargas corona se dão em ordem microscópica e ocorrem em média a aproximadamente 1 mm a partir de cada eletrodo de descarga (ZAMANY, 1992).

Inicialmente para se determinar as cargas nas partículas para posterior cálculo das forças que atuam sobre as mesmas, é necessário conhecer a densidade de carga no espaço devido ao efeito das descargas corona. A densidade de carga total que se encontra ao longo do espaço entre os eletrodos de descarga e as placas coletoras,  $\rho_s$ , recebe contribuições dos elétrons livres, das cargas iônicas e finalmente das partículas carregadas no fluxo de gás conforme a Equação (5.1).

$$\rho_s = \rho_e + \rho_i + \rho_p \quad (5.1)$$

Onde  $\rho_e$  é a densidade de carga devido aos elétrons livres,  $\rho_i$  é a densidade de carga devido às cargas iônicas e  $\rho_p$  a densidade de carga devido às partículas carregadas. A contribuição dos elétrons livres é insignificante para as condições de operação para PES típicos (ZAMANY, 1992), como é o caso dos que serão simulados neste trabalho. A contribuição das cargas iônicas no cálculo das forças que atuam sobre as partículas também foi desconsiderada na metodologia, considerando somente a contribuição da densidade de cargas nas partículas  $\rho_p$ .

Devido à complexidade de descrever o fenômeno, adotou-se que o eletrodo de descarga é um ponto de emissão e a densidade de carga elétrica nas partículas que fluem entre os eletrodos de descarga e as placas coletoras dependem do tipo de carregamento adotado. O processo de carregamento depende de diversas variáveis já descritas no trabalho e que podem ser elétricas, como é o caso do potencial elétrico aplicado entre o eletrodo de descarga e a placa coletora, do campo elétrico ao longo do PES, da corrente que flui entre os eletrodos e das densidades de cargas elétricas no meio.

Outras características de natureza não elétrica como o diâmetro,

a constante dielétrica e a resistividade do material particulado também influenciam no tipo de carregamento que atua nas partículas. Duas formas de carregamento de partículas (campo e difusão) e que dependem predominantemente do diâmetro são adotadas na metodologia para obtenção das densidades de cargas nas partículas.

No caso de partículas com diâmetros superiores a  $1\ \mu\text{m}$  o efeito do campo é predominante e adota-se a equação 2.2 para o cálculo. Supondo que todas as partículas atinjam seu limite de saturação de carga, ou limite de Pauthenier, a carga na partícula pode também ser obtida a partir da equação 2.3 (PAUTHENIER; MOREAU-HANOT, 1932).

Já para o caso de partículas com diâmetros inferiores a  $1\ \mu\text{m}$  o efeito predominante se dá por difusão e adota-se para o cálculo a equação 2.4 (WHITE, 1963).

Há também a possibilidade de considerar simultaneamente ambos os efeitos, campo e difusão, para isto utiliza-se a equação 2.5 (WHITE, 1963).

A partir do carregamento das partículas, pode-se obter a densidade de carga nas mesmas por meio da informação da tensão de operação do PES, ou seja, da diferença de potencial entre os eletrodos de descarga e as placas coletoras.

O código do MSC foi desenvolvido no software GNU Octave (RAWLINGS; EKERDT, 2015) para se obter as grandezas de natureza elétrica e que estão ligadas principalmente ao processo de carregamento das partículas dispersas no gás. A partir do potencial é possível calcular o campo elétrico por meio da equação 3.8 do MSC e substituí-lo numa das equações 2.2, 2.4 ou 2.5 para determinar as cargas nas partículas.

As equações 2.2 e 2.4 dependem ainda da densidade de corrente,  $J$  que pode ser calculada, ou ainda, medida a partir das placas coletoras. No caso do cálculo de  $J$  para as aplicações típicas de PES tipo duto, como é o caso dos exemplos que serão apresentados neste trabalho, é possível obtê-la por meio da equação 2.14 (COOPERMAN, 1981).

É necessário então, adequar as equações 2.2 à 2.5 aos métodos numéricos utilizados na metodologia para obtenção das cargas nas partículas em cada ponto ou célula da malha do PES como as apresentadas na figura 43.

Para isto, supondo que todas as partículas sejam esféricas, adequa-se a cada célula MCFD, Figura 44, uma partícula esférica equivalente cujo volume é igual a fração do volume ocupado pela fase sólida  $\varepsilon_m$  na célula. Logo, este volume equivalente  $V_{p\text{cell}}$ , pode ser obtido por meio da equação 5.2.

$$V_{pcell} = V_{cell} \cdot \varepsilon_m \quad (5.2)$$

$V_{cell}$  é o volume da célula, e  $\varepsilon_m$  a fração de volume da fase sólida. O diâmetro desta partícula equivalente é dado pela equação (5.3).

$$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \cdot V_{pcell}} \quad (5.3)$$

Para se obter a carga total  $Q_{cell}$ , que esta partícula equivalente teria em cada célula, substitui-se o diâmetro  $d_p$  por  $d_{eq}$  nas equações de carregamento 2.2 à 2.4.

No caso do carregamento considerando somente o efeito do campo elétrico dado pela equação 2.2, a carga total  $Q_{cell}$  é dada pela equação (5.4).

$$Q_{cell} = \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \pi \varepsilon_0 d_{eq}^2 |\vec{E}| \left( 1 + \frac{4\varepsilon_0 |\vec{E}|}{Jt} \right)^{-1} \quad (5.4)$$

A densidade de carga em cada célula nas partículas carregadas no fluxo de gás pode ser obtida por meio da equação (5.5).

$$\rho_p = \frac{Q_{cell}}{V_{cell}} \quad (5.5)$$

Um resumo do processo para determinação da densidade de carga nas partículas em cada célula é apresentado na figura 45.

Conforme o diagrama da figura 45, utiliza-se os dados de entrada do MSC para os cálculos do campo elétrico e densidade de carga. Define-se então o tipo de carregamento e também a equação adotada para o cálculo das cargas nas partículas. Calcula-se a carga equivalente nas células  $Q_{cell}$  por meio das informações das frações de volume dos sólidos e da informação da malha do MCFD.

Finalmente determina-se a densidade de carga das partículas nas células por meio da equação 5.5, esta será um dos dados de entrada necessários para o cálculo das forças que atuam nas partículas devido ao campo elétrico.

Na sequência será detalhado como é feito o cálculo da força devido ao campo elétrico considerando o acoplamento dos métodos MSC e MCFD.



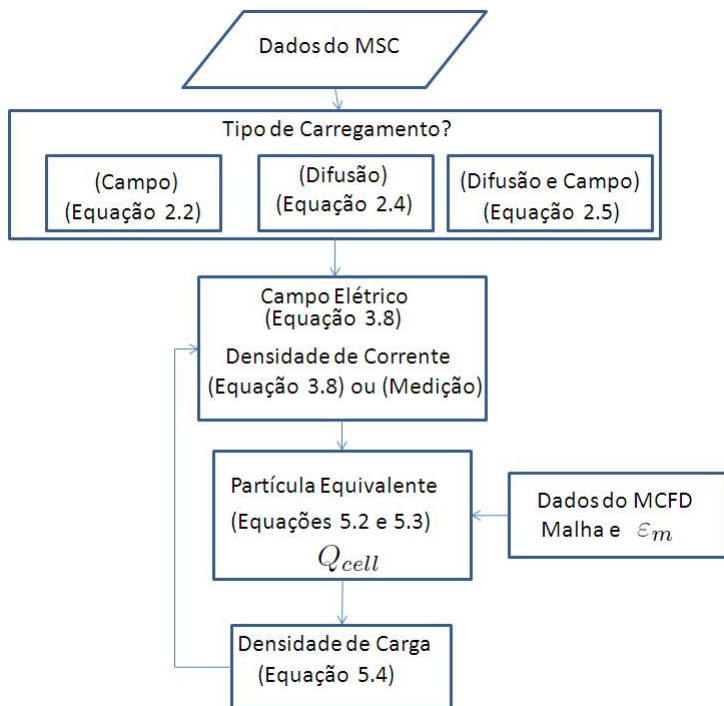


Figura 45 – Determinação da densidade de carga nas partículas

#### 5.4 FORÇAS DEVIDO AO CAMPO ELÉTRICO

Para finalizar o processo de acoplamento dos métodos e incluir a contribuição da força devido o campo elétrico é necessário fazer o compartilhamento das informações das grandezas elétricas e fluido-dinâmicas entre o MSC e o MCFD.

A força devido ao campo elétrico,  $\vec{F}_e$ , pode ser obtida pela equação 5.6

$$\vec{F}_e = \rho_p \vec{E} \quad (5.6)$$

$\vec{F}_e$  é a força devido ao carregamento das partículas, e  $\rho_p$  é a densidade equivalente de cargas nas partículas em cada célula dada pela equação (5.5) e  $\vec{E}$  o campo elétrico na região analisada.

Conforme visto no quarto capítulo, utilizou-se como parte da metodologia, a abordagem Euleriana que considera contínuo os meios multifásicos para resolver as equações fluidodinâmicas nos PES. A in-

clusão das contribuições das forças elétricas às demais forças já presentes no fluxo contínuo multifásico, utiliza-se a equação 4.18 da conservação da quantidade de movimento da fase sólida, apresentada no quarto capítulo.

A partir da equação 4.18 é possível incluir a força devido ao campo elétrico  $\vec{F}_e$ , resultando na equação 5.7.

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_m \rho_m U_{mi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_m \rho_m U_{mj} U_{mi}) \right] = -\varepsilon_m \frac{\partial P_g}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{mij}}{\partial x_j} - \sum_{m=1}^M I_{mli} + \varepsilon_m \rho_m g_i + \vec{F}_e \quad (5.7)$$

Para incluir a força  $\vec{F}_e$  na equação 5.7, foram necessárias algumas modificações nas subrotinas (sourceus.f, sourcevs.f e sourcews.f) do programa MFIX, cujo código é escrito em FORTRAN. Com base nestas subrotinas, em cada célula da malha é possível adicionar as componentes das forças devido ao campo elétrico e ao carregamento para atuarem sobre as partículas para que migrem na direção das placas coletoras.

Conforme apresentado nos diagramas das figuras 42 e 45, é possível incluir a contribuição da força elétrica nos deslocamentos das partículas em cada célula. A partir da equação 5.6 utiliza-se os dados do módulo do campo elétrico calculados no MSC no ponto  $P_{equivalente}(x, y)$  e da densidade de carga por meio da equação (5.5) na célula considerada. Finalmente, calcula-se a contribuição dos deslocamentos por meio da equação 5.7.

As densidades de cargas variam ao longo do PES e principalmente ao longo do caminho entre os eletrodos de descarga e de coleta, quando as partículas se movimentam entre as zonas ativas e passivas do PES (PARKER, 1997). A velocidade de migração das partículas para a placa coletora será proporcional ao valor da força  $\vec{F}_e$  que é dada pela equação 5.6.

Finalmente, para se determinar a eficiência do processo de captura dos particulados na metodologia adotada, utiliza-se a equação 2.20, onde, a partir das informações das concentrações de particulados na entrada  $C_{in}$  e na saída  $C_{out}$  do PES é possível determinar o quão eficiente é o processo.

## 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado como é feito o acoplamento dos métodos utilizados para a avaliação do desempenho de PES a partir da utilização MCFD e do MSC. A metodologia se baseou nos conceitos teóricos a respeito do PES vistos no capítulo 2 e também das formulações apresentadas sobre cada método nos capítulos 3 e 4 deste trabalho.

Cada etapa do processo, entrada de dados, cálculo das grandezas mecânicas e elétricas e suas interações foram abordadas para se determinar as forças que atuam sobre as partículas e a eficiência do processo. Através de diagramas, um diagrama geral abordando o acoplamento dos métodos e outro especificamente do carregamento foram apresentados para explicar as principais etapas da metodologia.

Na sequência serão apresentados alguns estudos de casos baseados na metodologia apresentada neste capítulo.



## 6 ESTUDOS DE CASOS

### 6.1 INTRODUÇÃO

No intuito de avaliar a eficiência de PES e para se obter uma melhor compreensão a respeito das grandezas que impactam na eficiência no processo de precipitação, neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações obtidos a partir da metodologia proposta.

Para obtenção destes resultados, utilizou-se o código desenvolvido no GNU Octave para o MSC em duas dimensões juntamente com o software MFIX para o MCFD em três dimensões, simulando assim, o acoplamento entre o MCFD e o MSC.

Estes dois softwares utilizados são gratuitos e desenvolvidos para o sistema operacional Linux e podem ser obtidos nos próprios sites dos desenvolvedores (RAWLINGS; EKERDT, 2015; SYAMLAL; ROGERS; BRIEN, 1993). Utilizou-se para simular estes estudos de casos a versão 4.0.0 do GNU Octave e a versão 2012-01 do MFIX. As adaptações necessárias para haver o compartilhamento entre as grandezas elétricas e mecânicas entre os dois softwares se baseou no que foi apresentado no capítulo 5.

Além dos softwares da etapa de processamento, utilizou-se o software Paraview 3.10-1 para visualizar os resultados gerados pelo MFIX (MORELAND, 2011).

Um computador HP com CPU Intel T5470, Duo Core 1,6 GHz, 3 GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 14.04.03 LTS realizou as simulações.

Selecionou-se três estudos de casos ao longo do período de estudo, os quais apresentavam uma maior disponibilidade de dados para futuras comparações e validação da metodologia.

O primeiro é um estudo aplicado a um pequeno PES em escala de laboratório (PARASRAM, 2001; LONG, 2010), cujas características são amplamente utilizadas como referência em estudos na área. O segundo estudo baseia-se nas informações construtivas e de operação de um PES utilizado no trabalho de (EEDEN, 2003) e que opera numa usina termelétrica à carvão mineral. Finalmente, o último estudo de caso, baseia-se em dados obtidos em campo de um PES que opera em uma usina termelétrica à carvão mineral instalado no Brasil.

Apresenta-se como resultados destas simulações as distribuições dos fluxos dos gases e sólidos no interior do precipitador, as informações de campo elétrico, da densidade de carga e da eficiência do processo.

Estes resultados são comparados com aqueles obtidos por outros autores e também com os dados em campo na usina.

## 6.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Apesar dos estudos de casos serem aplicados para diferentes condições de operação e tipos de precipitadores, a mesma forma é adotada para descrever os modelos a partir da metodologia MCFD e MSC.

No intuito de reduzir o tempo das simulações, apenas duas placas coletoras são consideradas nos modelos computacionais, como mostrado na figura 46.

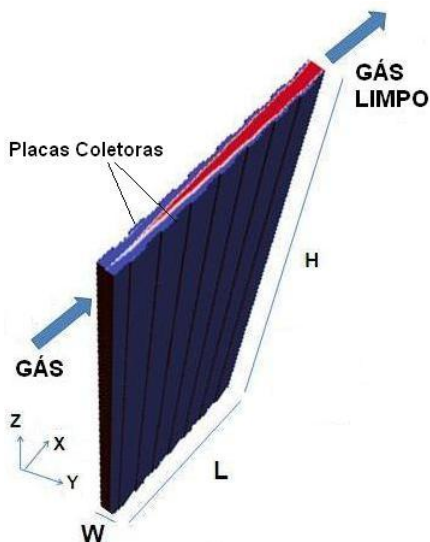


Figura 46 – Modelo de um PES para uma termelétrica

As dimensões reais das placas coletoras foram mantidas para verificação da eficiência em cada simulação dos PES. Esta simplificação foi adotada principalmente para os PES de grande porte, como é o caso daqueles utilizados nas termelétricas, já que existem diversas destas mesmas placas dispostas paralelamente no interior e que são utilizadas para a filtragem total dos gases.

Os eletrodos de descargas também foram considerados nos modelos apesar de não aparecerem entre as placas coletoras na figura 46. Para cada estudo de caso, as dimensões destes eletrodos e as distâncias

entre os mesmos foram baseadas nas referências bibliográficas e especificações dos fabricantes.

Para realizar cada simulação, as informações de velocidade, concentração, tensão de operação, densidade, diâmetro, permissividade, resistividade e dimensões dos PES são utilizadas como dados de entrada para os softwares, como no exemplo do arquivo de entrada de dados do MFIX (mfix.dat) apresentado no anexo C.

Além de especificar as informações relativas às dimensões, condições de operação e às características do gás e sólidos, é também necessário definir as malhas para ambos os métodos. Na figura 47 é apresentada a malha gerada pelo MFIX que corresponde ao modelo da figura 46.

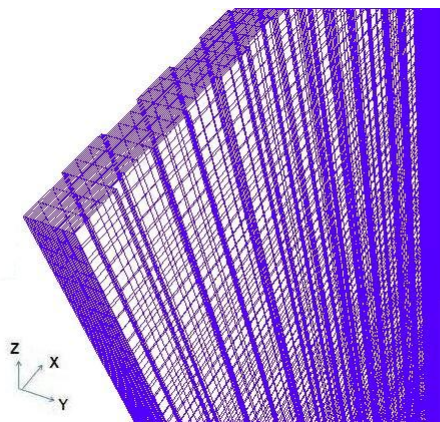


Figura 47 – Malha MCFD para o PES da figura 46

Para geração dos elementos da malha da figura 47 utilizou-se o método descrito por (DIETIKER, 2012). Este método se baseia no trabalho de (KIRKPATRICK; ARMFIELD; KENT, 2003) sendo possível utilizá-lo em modelos com diferentes formas geométricas tanto em duas como em três dimensões.

Para ilustrar como é feita a discretização dos pontos no MSC, uma região selecionada da figura 46 contendo um único eletrodo de descarga entre duas placas coletoras é apresentada na figura 48.

Semelhantemente ao exemplo de PES ilustrado na figura 32 no capítulo 3, os eletrodos de descargas e as placas coletoras são modeladas utilizando as cargas de simulação e os pontos de contornos para calcular as grandezas elétricas nos pontos da malha. A quantidade de cargas de simulação, pontos de contorno e pontos da malha são especificados em cada estudo de caso.

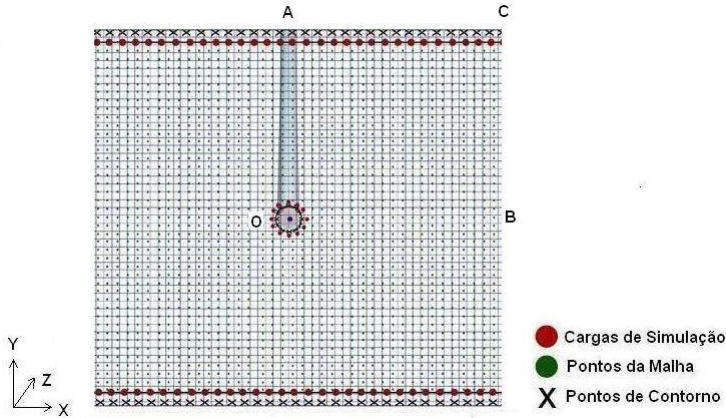


Figura 48 – Pontos do MSC de uma região do PES da figura 46

Toda a área do PES foi mapeada tanto para a malha do MSC, figura 48, como também para a malha do MCFD, figura 47. Ambas as malhas utilizam os mesmos pontos de referência e sistema de coordenadas para resolver as equações em cada ponto.

Conforme o que foi apresentado no capítulo 5, adotou-se como constantes as grandezas elétricas ao longo de um eixo para reduzir o tempo das simulações no MSC. Isto pode ser ilustrado para os estudos de casos por meio da figura 48. Os valores de potencial e campo elétrico obtidos no MSC para o plano XY são repetidos ao longo do eixo Z em cada célula MCFD na figura 47.

Baseado nas geometrias dos PES e nas simplificações adotadas, os cálculos dos coeficientes de potencial para o MSC se deram a partir de aproximações através de linhas infinitas de cargas cujas equações encontram-se no anexo B (MALIK, 1989).

Para o MCFD foram utilizados nos modelos as seguintes condições de contorno e algumas simplificações listadas abaixo:

1. Velocidades constantes do gás e dos sólidos na entrada do PES;
2. Pressão constante do gás na saída dos PES;
3. Condições de contorno de Johnson e Jackson nas placas coletoras para incluir o efeito dos impactos das partículas nas placas coletoras (LI; BENYAH, 2012);
4. Todas as partículas foram consideradas esféricas.



Já no MSC as condições de contorno consideradas foram:

1. Tensão de operação do PES aplicada na superfície dos eletrodos de descarga;
2. Todos os pontos sobre a superfície da placa coletora foram considerados aterrados.

Baseado no algoritmo apresentado na figura 42 e nos softwares já citados para simular o acoplamento entre os métodos. Na sequência, para cada estudo de caso apresenta-se os resultados das simulações obtidos a partir das condições descritas anteriormente e da metodologia proposta.

### 6.3 PRECIPITADOR EM ESCALA DE LABORATÓRIO

No intuito de validar a metodologia proposta, este primeiro estudo de caso apresenta a aplicação do método para um PES em escala de laboratório. Os trabalhos de (PARASRAM, 2001; LONG, 2010) foram utilizados como referências e apresentam diversos resultados obtidos tanto a partir de medições como também através de simulações para diferentes condições de operação de um PES em escala de laboratório. Uma representação do experimento adotado por (PARASRAM, 2001) para os testes pode ser visualizado na Figura 49, o qual apresenta um túnel de vento com o PES no seu interior.

Para o experimento da figura 49, a figura 50 apresenta os detalhes construtivos na região do PES.

As especificações das dimensões geométricas adotadas no modelo do PES estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões para o modelo da figura 50

Comprimento das placas, L (mm)	250
Altura das placas, H (mm)	50
Distância entre placas, W (mm)	50
Distância entre eletrodos de descarga (mm)	50
Diâmetro dos eletrodos de descarga (mm)	1
Número de eletrodos de descargas (-)	3
Área total de coleta (mm <sup>2</sup> )	25000

Nos estudos apresentados por (PARASRAM, 2001; LONG, 2010)



tabela 4 (LONG, 2010).

Tabela 4 – Distribuição granulométrica das partículas

%	Diâmetros das partículas
5,0	4 $\mu\text{m}$
5,0	5 $\mu\text{m}$
20,0	6 $\mu\text{m}$
30,0	7 $\mu\text{m}$
20,0	8 $\mu\text{m}$
20,0	9 $\mu\text{m}$

Baseado na tabela 4 o diâmetro médio adotado para as partículas nas simulações foi de 7  $\mu\text{m}$ .

As condições de operação e as principais características do gás e das partículas estão apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 – Condições de operação e as características do gás e sólidos

Velocidade de gás e sólidos, $U$ (m/s)	1
Tensão de operação, $\phi$ (kV)	15
Velocidade de migração, $\omega$ (cm/s)	80
Temperatura, $T$ (K)	293
Densidade do gás( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1.2
Viscosidade do gás ( $\text{Kg}/\text{m.s}$ )	$1.88 \times 10^{-5}$
Diâmetro médio das partículas, $d_p$ (m)	$7 \times 10^{-6}$
Densidade das partículas, $\rho_m$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	3.970
Resistividade das partículas de $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\rho(\Omega.\text{cm})$	$1 \times 10^{12}$
Constante dielétrica da partícula	13.3
Mobilidade do íon, $10^{-4} \text{m}^{-2}/\text{V.s}$	2.2

A malha adotada para o MCFD e utilizada para obter os resultados das grandezas fluidodinâmicas nas simulações do PES está apresentada na figura 51.

As dimensões e quantidades de células utilizadas na simulação estão apresentadas na tabela 6.

Na figura 52 é apresentada a localização dos pontos de contorno (azul) e das cargas fictícias (vermelho) no MSC.

Na tabela 7 são apresentados os dados das distâncias entre os pontos na malha MSC.

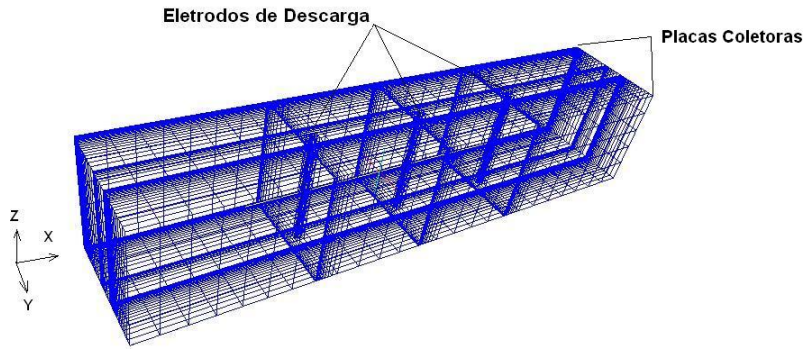


Figura 51 – Malha do MCFD para o PES em escala de laboratório

Tabela 6 – Quantidades e dimensões das células MCFD por eixo

Eixo	Quantidade	Dimensão (mm)
X	50	5
Y	25	2
Z	5	10

Tabela 7 – Distâncias adotadas entre pontos no MSC

Local	X(mm)	Y(mm)
Malha	1	1
Cargas de Simulação	1	1
Pontos de Contorno	1	1

A partir dos modelos adotados apresentados nas figuras 51 e 52, das dimensões geométricas do PES na tabela 3, das condições de operação na tabela 5, são apresentados a seguir os resultados das simulações das grandezas elétricas e fluidodinâmicas utilizando a metodologia proposta. Estes resultados são comparados com os obtidos nos trabalhos de (LONG, 2010; PARASRAM, 2001).

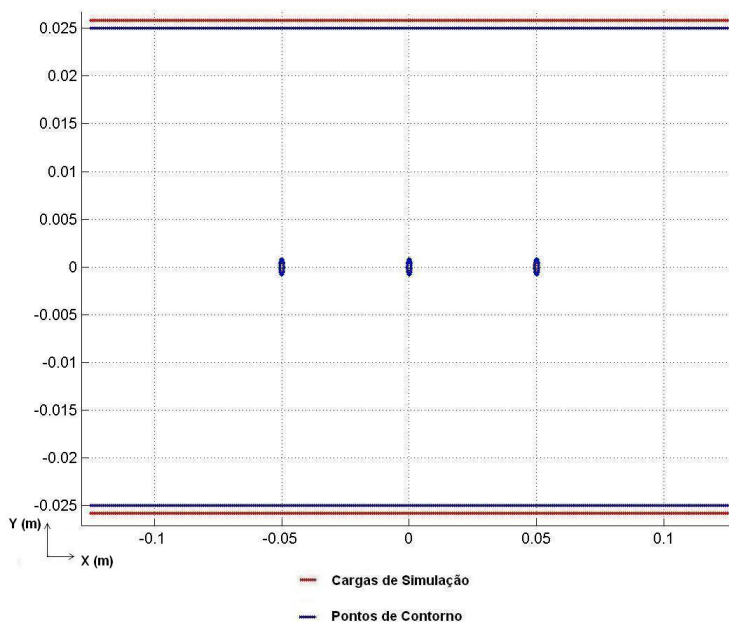


Figura 52 – Localização dos pontos de contorno e cargas fictícias do MSC

### 6.3.1 Resultados

Inicialmente, na figura 53 apresentam-se os resultados das simulações obtidos para os perfis das linhas equipotenciais baseado no MSC.

Para as mesmas condições simuladas no caso da figura 53, apresenta-se na Figura 54 os resultados obtidos por (LONG, 2010).

Comparando-se ambos os resultados, Figuras 53 e 54, percebe-se que as distribuições das equipotenciais apresentam o mesmo perfil, círculos circundando os eletrodos de descarga.

As regiões próximas aos eletrodos de descargas apresentam os máximos valores 1 p.u.  $kV$  e decrescem de forma exponencial na direção das placas coletoras (aterradas).

Observa-se também que na metade da distância entre um ele-

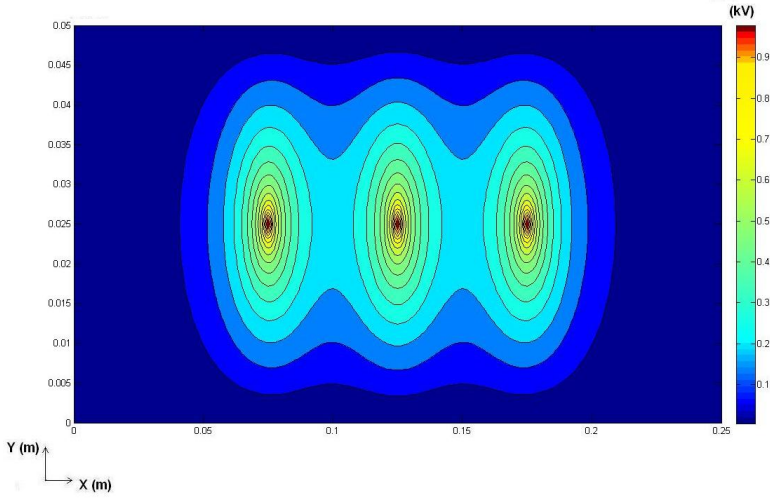


Figura 53 – Linhas equipotenciais em p.u. para o PES de laboratório

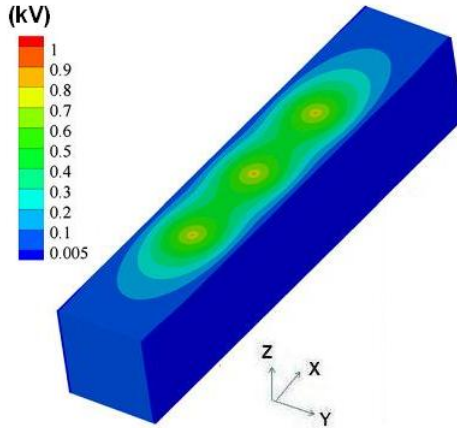


Figura 54 – Linhas equipotenciais em p.u. segundo (LONG, 2010)

trodo de descarga e a placa coletora o valor do potencial é de 0.3 p.u. V em ambas as situações.

Outra análise foi feita para se comparar a distribuição das densidades de cargas elétricas ao longo do precipitador, os resultados obtidos pelo autor e por (LONG, 2010) estão apresentados respectivamente nas

figuras 55 e 56.

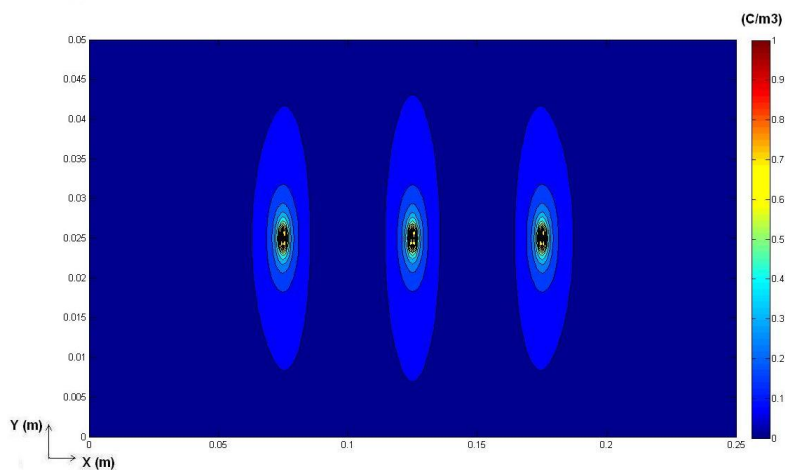


Figura 55 – Densidade de cargas em p.u. ao longo do PES

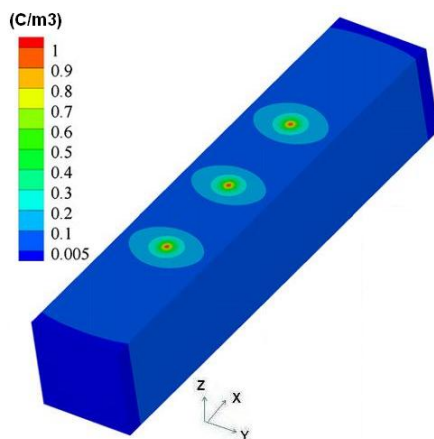


Figura 56 – Densidade de cargas em p.u. ao longo do PES (LONG, 2010)

Observa-se também que os resultados das distribuições das cargas ao longo do PES das figura 55 e 56 apresentam o mesmo perfil,

elipses circundando os eletrodos de descarga. As regiões próximas aos eletrodos de descargas apresentam os máximos valores 1 p.u.  $C/m^3$  e decrescem de maneira exponencial na direção das placas coletoras.

Para um quarto da distância entre um eletrodo de descarga e a placa coletora os valores das densidades de carga são reduzidos à praticamente zero em ambos os casos.

São apresentados também nas figuras 57, 58 e 59, os resultados das simulações do MSC para as equipotenciais, o campo elétrico e a densidade de carga na região entre o eletrodo de descarga e da placa coletora.

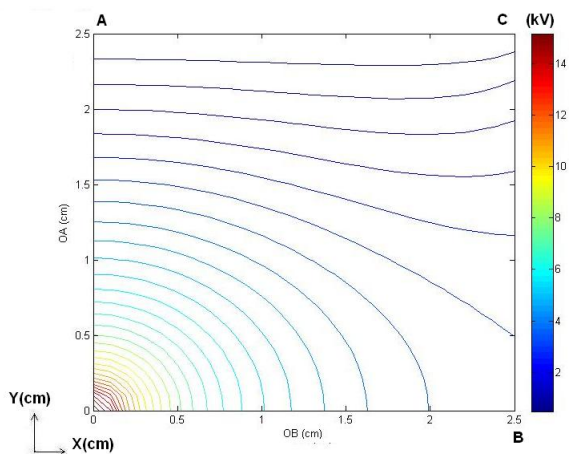


Figura 57 – Equipotenciais no quadrante 0ACB (figura 48)

Os resultados apresentados nas figuras 57 à 59 são os esperados para uma condição normal de operação do PES, pois os valores de potencial, campo elétrico e densidade de cargas devem ser maiores na região próxima do eletrodo de descarga e decrescem à medida que se aproximam da placa coletora.

Com relação às simulações da parte fluidodinâmica, as figuras 60 e 61 apresentam respectivamente os resultados das simulações dos fluxos do gás e sólidos ao longo do precipitador para o MCFD e para o que foi obtido no trabalho de (LONG, 2010).

Comparando-se as figuras 60 e 61 é possível observar que o perfil do fluxo em ambos os casos se aproximam. Nas regiões próximas aos eletrodos de descarga há predomínio de turbulência devido às colisões do gás e partículas com os eletrodos e ao efeito das forças elétricas



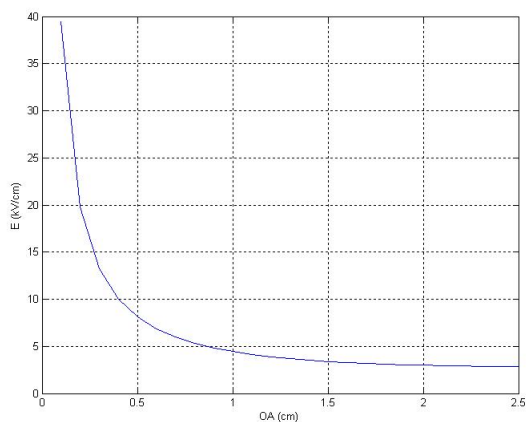


Figura 58 – Distribuição do módulo do Campo Elétrico ao longo de OA (figura 48)

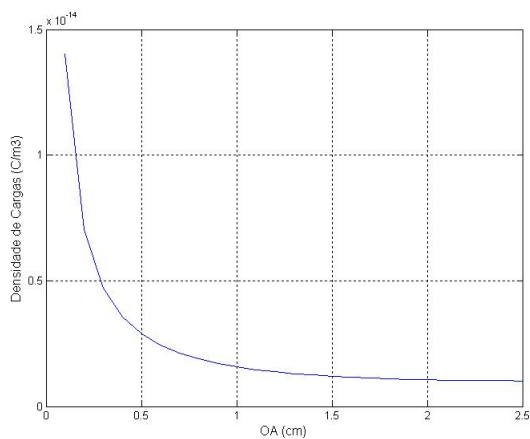


Figura 59 – Densidade de cargas ao longo de OA (figura 48)

atuando sobre as partículas que migram na direção das placas coletoras. Já nas regiões próximas das placas coletoras o fluxo é menos turbulento em ambas as figuras.

Na tabela 8 estão apresentados os valores das eficiências obtidas para o PES a partir da metodologia proposta, do trabalho de (PARAS-

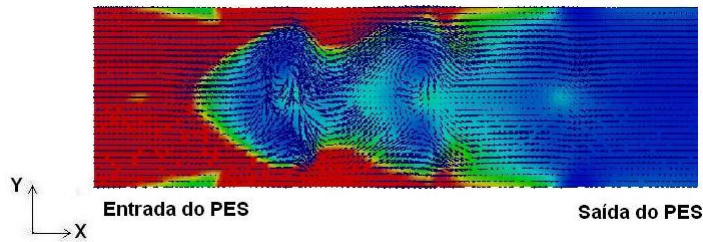


Figura 60 – Fluxo de gás e sólidos ao longo do PES

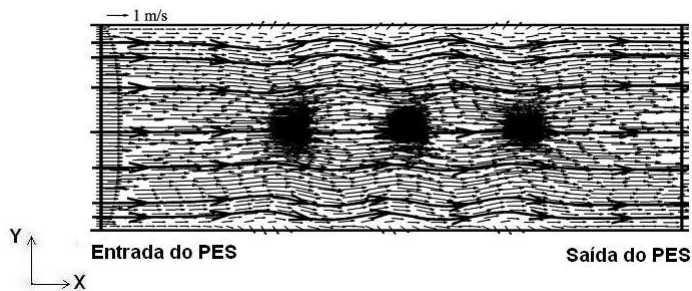


Figura 61 – Distribuição do gás e sólidos ao longo do eixo z

RAM, 2001) e também da equação de Deutch-Anderson 2.21.

Tabela 8 – Comparação da Eficiência - Escala de Laboratório

-	MSC-MCFD	(PARASRAM, 2001)	Eq. (2.21)
Eficiência, $\eta$ (%)	99.0	97.0	99.9

Observa-se na tabela 8 que os valores também ficaram bem próximos em todos os casos, com a máxima diferença entre os valores de 3 % mostrando uma convergência dos resultados e também uma alta eficiência no processo de coleta das partículas de  $Al_2O_3$ .

Considerou-se nesta simulação que o PES operava durante 2 segundos e o passo de tempo de  $1.10^{-4}s$ . Para estas condições o tempo total de processamento foi de 16 horas, 10 minutos e 12 segundos.

## 6.4 USINA TERMELÉTRICA - ÁFRICA DO SUL

No intuito de avaliar a aplicação da metodologia proposta para um estudo de caso aplicado à PES de usinas termelétricas, utilizou-se como referência o trabalho de (EEDEN, 2003). Este baseou-se em dados de operação e de fabricante para um PES instalado na África do Sul. No trabalho de (EEDEN, 2003) há um estudo mais focado na parte fluidodinâmica, o modelo utilizado por ele pode ser visualizado na Figura 62.

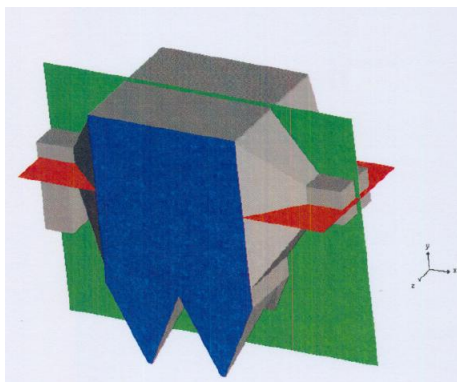


Figura 62 – Modelo de PES utilizado por (EEDEN, 2003)

Como já mencionado anteriormente, algumas simplificações foram adotadas no modelo com relação ao tamanho e às características reais do PES, principalmente ao número de placas coletoras. Nas simulações adotou-se somente duas placas coletoras conforme apresentado na figura 63.

As especificações da geometria e dimensões adotadas no modelo estão apresentadas na tabela 9.

Um resumo da distribuição granulométrica das cinzas que determina o diâmetro médio das partículas para o modelo pode ser visto na tabela 10.

Observa-se que a maior parte da cinza, 80 %, encontra-se na faixa acima de  $3\mu\text{m}$ , isto faz com que o carregamento das partículas seja feito predominantemente por meio do efeito de campo. A partir das informações da tabela 10, adotou-se  $10\mu\text{m}$  o diâmetro médio das cinzas no modelo para as simulações.

Um resumo das condições de operação e das principais carac-

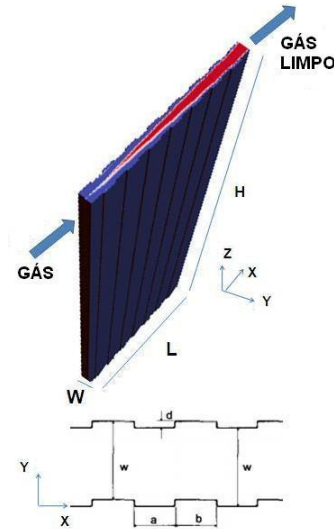


Figura 63 – Modelo adotado para o PES de uma termelétrica

Tabela 9 – Dimensões para o modelo da figura 63

Comprimento das placas, L (mm)	17280
Altura das placas, H (mm)	13750
Distância entre placas, W (mm)	300
Distância entre eletrodos de descarga (mm)	150
Diâmetro dos eletrodos de descarga (mm)	3
a (mm)	300
b (mm)	300
d (mm)	30
Área de coleta (m <sup>2</sup> )	287.5

terísticas dos gases e partículas estão apresentados na tabela 11.

Uma região da malha adotada para o MCFD e utilizada para obter os resultados das grandezas fluidodinâmicas nas simulações do PES está apresentada na figura 64. As dimensões e o número de células em cada eixo estão apresentadas na tabela 12.

Na figura 65 é apresentada a localização dos pontos de contorno (azul) e das cargas fictícias (vermelho). As distâncias adotadas entre os pontos na malha MSC estão especificadas na tabela 13.

Tabela 10 – Distribuição granulométrica das cinzas (EEDEN, 2003)

%	Diâmetro das partículas
20,0	$< 3 \mu\text{m}$
20,0	$3\text{-}5 \mu\text{m}$
25,0	$5\text{-}10 \mu\text{m}$
20,0	$10\text{-}20 \mu\text{m}$
15,0	$>20 \mu\text{m}$

Tabela 11 – Condições de operação e dados de fabricante (EEDEN, 2003)

Velocidade de gás e sólidos, $U$ (m/s)	1.28
Tensão de operação, $\phi$ (kV)	39
Velocidade de migração, $\omega$ (cm/s)	5,5
Tempo de limpeza dos gases, (s)	12
Eficiência média, $\eta$ (%)	99.32
Área total de coleta, $A_t$ ( $\text{m}^2$ )	36.115
Fluxo dos gases e sólidos na entrada, $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	384
Temperatura, $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	205
Densidade do gás( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	0.593
Viscosidade do gás ( $\text{Kg}/\text{m.s}$ )	$1.88 \times 10^{-5}$
Particulados na entrada ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )	29200
Particulados na saída ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )	200
Diâmetro médio das partículas, $d_p$ (m)	$10 \times 10^{-6}$
Densidade das partículas, $\rho_m$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.4
Resistividade das partículas, $\rho_{ash}$ ( $\Omega.\text{cm}$ )	$1.10^{10}$
Constante dielétrica da partícula	5

Tabela 12 – Quantidades e dimensões das células MCFD por eixo

Eixo	Quantidade	Dimensão (mm)
X	173	100
Y	33	10
Z	138	100

Com base no modelo adotado apresentado na figura 63 e das condições de operações e dados do processo da tabela 11 são apresen-

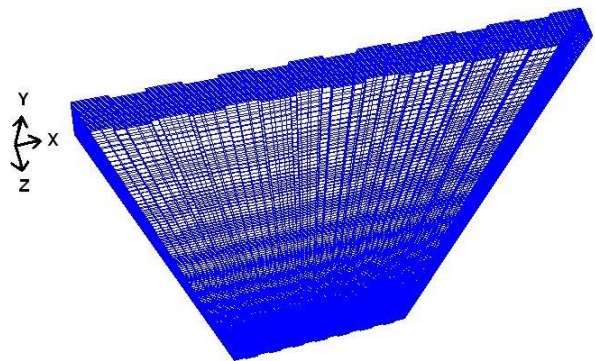


Figura 64 – Região da malha do MCFD para o PES

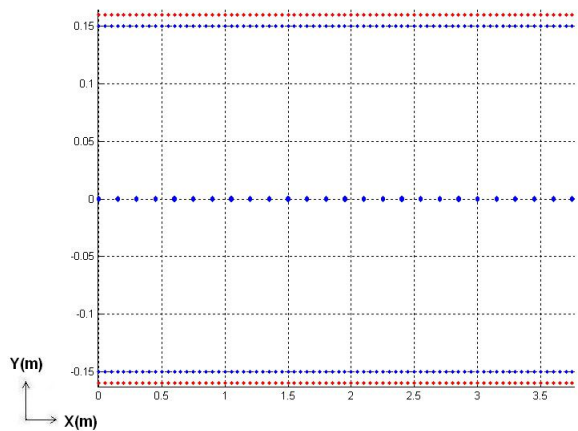


Figura 65 – Localização dos pontos de contorno e cargas fictícias do MSC

Tabela 13 – Distâncias adotadas entre os pontos no MSC

Local	X(mm)	Y(mm)
Malha	20	20
Cargas de Simulação	20	20
Pontos de Contorno	20	20

tados na sequência os resultados obtidos para as grandezas elétricas e fluidodinâmicas a partir da metodologia proposta.

### 6.4.1 Resultados

Neste estudo de caso considerou-se que o PES opera durante 20 segundos. Os resultados das simulações obtidos a partir do MSC referente às grandezas elétricas: equipotenciais, densidade de carga e campo elétrico podem ser vistos nas figuras 66 à 69.

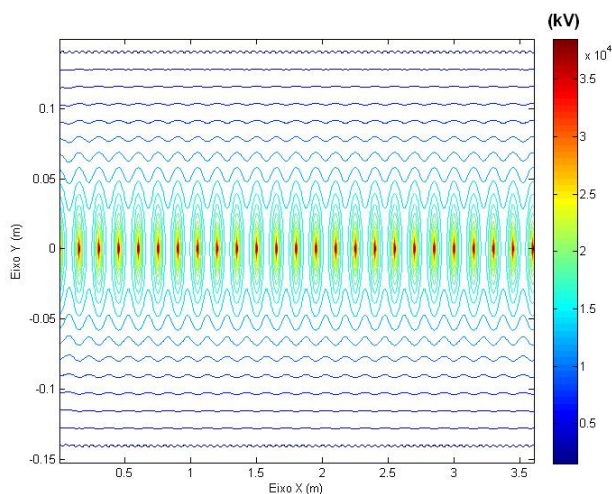


Figura 66 – Equipotenciais ao longo do precipitador

Os resultados apresentados nas figuras 66 à 69 são os esperados para uma condição normal de operação do PES, pois os valores de potencial, campo elétrico e densidade de cargas devem ser maiores na região próxima do eletrodo de descarga e decrescem à medida que se aproximam da placa coletora.

Três diferentes análises são realizadas para se verificar a eficiência do processo fluidodinâmico multifásico de coleta das partículas. Na primeira compara-se a fração de volume ocupada pelas partículas e o gás na entrada e na saída do PES. Na segunda, verifica-se ao longo de todo o comprimento do precipitador a distribuição das partículas. Por último, verifica-se a distribuição das partículas entre as duas placas coletoras analisada num ponto referente à metade do percurso entre a entrada e saída do PES.

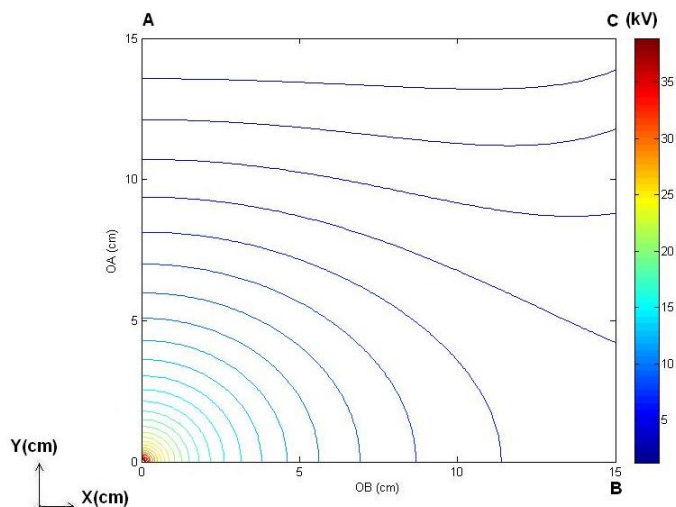


Figura 67 – Equipotenciais no quadrante 0ACB (figura 48)

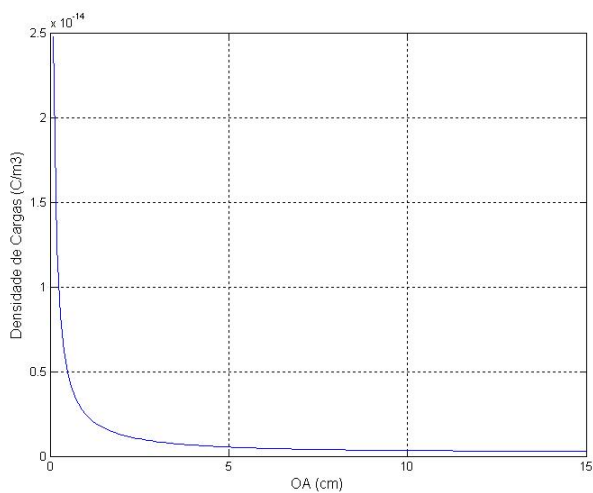


Figura 68 – Densidade de cargas ao longo do segmento OA (figura 48)

Os resultados da distribuições dos fluxos do gás e sólidos e as frações de volume ocupada pelo gás e partículas nas regiões próximas



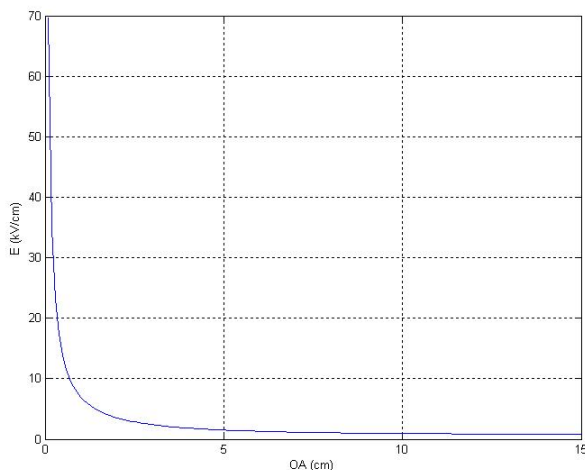


Figura 69 – Módulo do Campo Elétrico ao longo do segmento OA (figura 48)

da entrada e da saída do precipitador após o tempo de simulação estão apresentadas respectivamente nas figura 70 e 71, onde as setas nestas figuras representam a direção do fluxo dos gás no PES.

Pode-se observar na figura 70 que as partículas estão homoganeamente distribuídas no fluxo. Já a figura 71 mostra que existem poucas partículas no fluxo do gás próximo da saída do PES, mostrando que a grande maioria foi coletada ao longo do PES.

A evolução da quantidade de partículas aderidas nas placas coletoras a partir da entrada até a saída do PES, ou ao longo do eixo  $x$  na figura 63 (entrada  $x = 0$  cm e saída  $x = 18000$  cm), é apresentada na figura 72.

As informações das distribuições dos fluxos do gás e sólidos e as frações de volume ocupada pelo gás e partículas entre as duas placas coletoras, ou ao longo do eixo  $y$  na figura 63, está apresentada na figura 73.

Nas figuras 70 à 73, a fração de vazios igual a 1 representa a existência de somente gás no meio, 0,95 representa a mesma concentração de partículas na entrada do PES e valores que se aproximam de zero representam uma concentração ainda maior de sólidos na região.

Pode-se observar na figura 73 que as partículas ficam concentra-

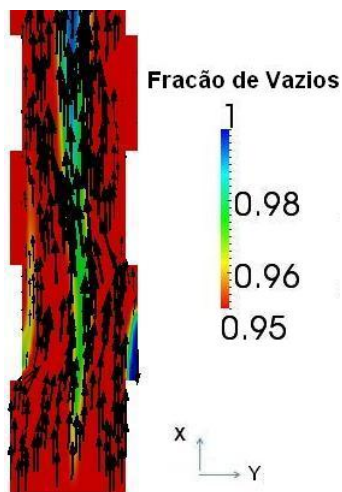


Figura 70 – Concentração do fluxo de gás e sólidos na entrada do PES

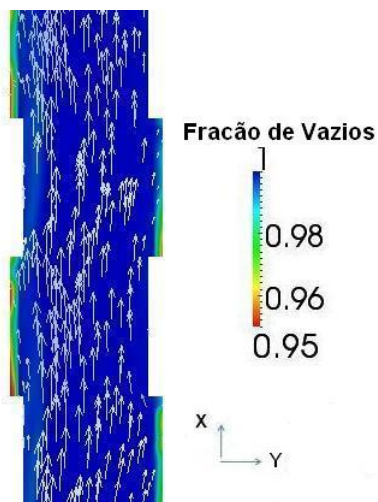


Figura 71 – Concentração do fluxo de gás e sólidos na saída do PES

das na região das placas coletoras ( $y=0$  e  $y=30$  cm onde as frações de vazios ficam próximas de 0.95) e o gás limpo concentra-se no centro do PES, onde a fração de vazios aproxima-se de 1.

Uma comparação entre os resultados obtidos pela metodologia

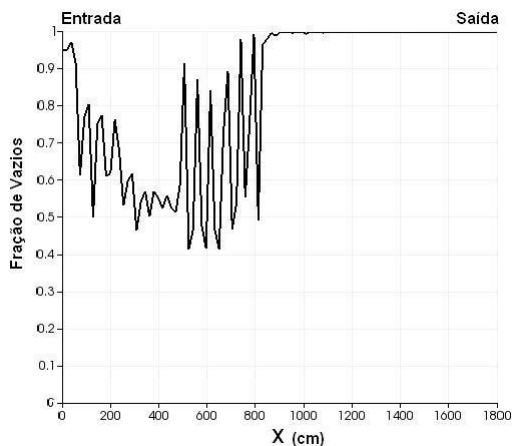


Figura 72 – Distribuição do gás e sólidos ao longo do precipitador

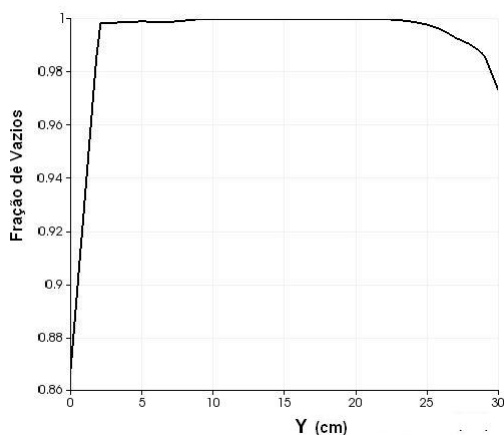


Figura 73 – Concentração de partículas ao longo do eixo y

proposta utilizando o MCFD-MS, os dados do PES da usina termelétrica, e a equação de Deutsch-Anderson 2.21 estão apresentados na tabela 14.

Observa-se na tabela 14 que todos os valores se aproximam dos resultados de (EEDEN, 2003). A máxima diferença encontrada foi de 0.38 % para a equação (2.21). Os resultados obtidos pela metodologia mostram que é possível aplicá-la à PES de usinas termelétricas.

Tabela 14 – Comparação da Eficiência

-	MSC-MCFD	(EEDEN, 2003)	Eq. (2.21)
Eficiência, $\eta$ (%)	99.00	99.32	99.7
Erro, (%)	0.32	0	0.38

Considerou-se nesta simulação que o PES operava durante 20 segundos e o passo de tempo de  $1.10^{-4}$ s. Nestas condições, o tempo total de processamento foi de 9 dias, 11 horas e 15 minutos.

## 6.5 USINA TERMELÉTRICA - BRASIL

Um estudo de caso relacionado às características das termelétricas brasileiras é apresentado nesta parte do trabalho. Utilizou-se informações técnicas do fabricante e também dados de operação obtidos diretamente do PES instalado numa usina termelétrica em operação localizada no sul do Brasil. Uma foto deste PES pode ser visualizada na Figura 74.



Figura 74 – PES de uma usina brasileira

Além dos dados do PES citados anteriormente, no intuito de se adaptar o modelo às condições reais de operação, fez-se também, medições do diâmetro médio, da resistividade e da constante dielétrica das cinzas, sendo estes alguns dos principais fatores destacados no capítulo 2 e que influenciam significativamente o desempenho de PES. A partir das cinzas coletadas, foram realizadas estas medições e os valores incluídos nos modelos simulados como será apresentado na sequência.

### 6.5.1 Caracterização das cinzas da usina termelétrica

O diâmetro médio das cinzas estudadas foi determinado seguindo o método apresentado em (ABNT, 1993a). Baseado neste método, onze peneiras com malhas de diferentes diâmetros foram necessárias para se caracterizar o tamanho destas cinzas. Utilizou-se um agitador de peneiras, conforme pode ser visto na Figura 88 no anexo A. Este equipamento faz com que o material colocado na primeira peneira (ASTM 4, com o maior diâmetro considerado) migre através das peneiras obtendo-se assim a separação do material por diâmetro. No total foram consideradas as três melhores amostras, com 500 gramas cada, durante quinze minutos por amostragem. A Tabela 15 apresenta o percentual de massa retida em cada peneira.

Tabela 15 – Distribuição granulométrica das cinzas

Peneira	Massa (g)	%	Diâmetro da Malha ( $\mu\text{m}$ )
-	59.3	11.86	< 75
ASTM 200	36.5	7.30	75
ASTM 140	128.3	25.66	106
ASTM 100	76.3	15.26	150
ASTM 70	120.8	24.16	212
ASTM 50	15.8	3.16	300
ASTM 40	16.4	3.28	425
ASTM 30	8.4	1.68	600
ASTM 20	8	1.60	850
ASTM 12	13.5	2.70	1700
ASTM 6	5.8	1.16	3350
ASTM 4	5.9	1.18	4750
Total	495	99.9	-

Além da informação de massa na tabela 15, um estereoscópio também foi utilizado para analisar as amostras de cada peneira, estes resultados também podem ser vistos no anexo A.

Conforme pode ser observado na tabela 15 a peneira ASTM-140 apresentou a maior quantidade de cinzas leves, 25,66 % ou 128,3 g, uma imagem do material retido nesta peneira é apresentado na Figura 98.

Com base nestas medições e a fim de diminuir o esforço computacional, foi considerado que o diâmetro médio das partículas das cinzas seria de 100  $\mu\text{m}$ . A partir destas informações e baseado no que foi visto a respeito dos tipos de carregamento (campo e difusão) no capítulo 2, adotou-se nas simulações, somente a contribuição do carregamento por campo, pois uma quantidade muito superior de partículas 88,14%, apresentava diâmetros médios bem superiores a 1  $\mu\text{m}$ .

As geometrias reais das cinzas podem ser observadas nas figuras 89 a 100, como se pode constatar nestas figuras, algumas destas amostras apresentam partículas bem semelhantes à esferas o que também foi adotado no modelo.

Outro ponto importante na caracterização do material analisado é saber qual a sua composição química. Este pode ser um indicador de como a resistividade e a constante dielétrica do material se comporta. Dependendo do processo, às vezes, é necessária a inclusão de componentes químicos para alterar as características do material e melhorar a eficiência do PES. Na tabela 16 são apresentados os percentuais dos óxidos mais representativos da composição química das cinzas estudadas.

Tabela 16 – Caracterização das Cinzas Estudadas

Óxido	%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	27.6
$\text{SiO}_2$	57.7
$\text{TiO}_2$	1.40
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.08
$\text{MgO}$	0.75
$\text{CaO}$	1.05
$\text{Na}_2\text{O}$	0.59
$\text{K}_2\text{O}$	2.72
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.08
$\text{SO}_3$	0.56

É possível observar na tabela 16 que os principais óxidos são os de silício  $SiO_2$  (dióxido de silício) e alumina  $Al_2O_3$  (óxido de alumínio). Estes óxidos têm grande influência nas propriedades dielétricas e resistivas das cinzas.

Para se entender um pouco a respeito das propriedades dielétricas das cinzas e com o objetivo de medir o valor da permissividade relativa realizou-se também algumas medições baseadas na norma (ASTM, 1998). As três melhores amostras à 25 °C foram consideradas e os resultados à temperatura de 25 °C são mostrados na figura 75.

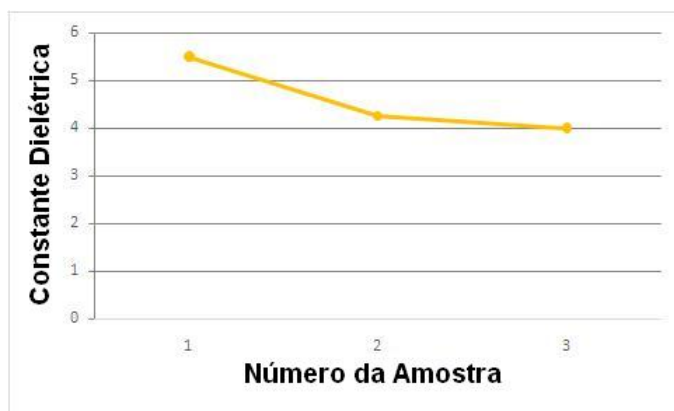


Figura 75 – Resultados das medições das constantes dielétricas da cinza

Para os principais óxidos da tabela 16, os valores máximos e mínimos da constante dielétrica estão apresentados na tabela 17 .

Tabela 17 – Valores máximos e mínimo da constante dielétrica

Óxido	Mínimo	Máximo
$Al_2O_3$	9.5	12
$SiO_2$	3.8	3.9

Pode-se observar pela figura 75 que a variação do valor da constante dielétrica encontra-se entre os limites máximos e mínimos dos principais óxidos, Alumina e Sílica, da tabela 17. Baseado nas medições o valor 5 foi adotado como valor da permissividade relativa para os modelos nas simulações.

A resistividade também é uma grandeza importante, como já

comentado, dependendo da faixa de valores (baixa , média ou alta) em que ela se encontra, o PES deverá estar adequado para operar nesta faixa.

Um procedimento padrão que pode ser utilizado para realizar a medição da resistividade elétrica em sólidos se baseia nos procedimentos da norma (ASTM, 1999). Esta norma é recomendada para medir valores elevados de resistividade elétrica e foi adotada neste estudo para medir a resistividade das cinzas coletadas. O procedimento foi realizado em três diferentes períodos, em cada período, foram efetuadas 26 medições, variando a tensão de 50 a 300 V, para a temperaturas de 25 °C. Os resultados estão apresentados na Figura 76.

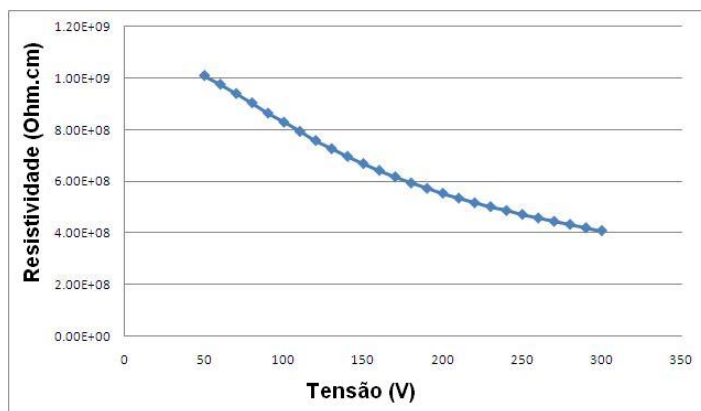


Figura 76 – Resistividade da cinza coletada

Pode ser observado na figura 76 que a a resistividade varia de  $4.10^8$  até  $1.10^9$  Ohm.cm a 25°C, um valor considerado normal de resistividade .

Os valores obtidos nas medições de resistividade têm relação com a composição química das cinzas. Conforme a tabela 16, existe uma elevada quantidade de alumina e sílica. A resistividade da alumina é cerca de  $10^{12}$  Ohm.cm e da sílica de  $10^{13}$  a  $10^{17}$  Ohm.cm a 25 °C. Outros óxidos como hematita contribuíram para diminuir a resistividade. Com base nestas medições adotou-se  $1.10^9$  Ohm.cm como resistividade média da cinza.

A seguir são apresentadas as especificações do modelo computacional adotado baseado nos dados de operação e de fabricante do PES para a usina termelétrica brasileira.



### 6.5.2 Modelo e Especificações do PES

Apenas dois eletrodos de coleta são considerados para avaliar a eficiência do modelo do PES. As especificações com relação a geometria e as dimensões do modelo estão apresentadas na Figura 77 e na tabela 18.

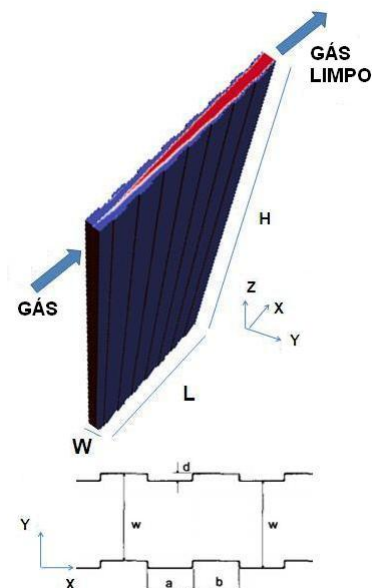


Figura 77 – Modelo adotado para o PES de uma termelétrica

As condições de operação e as principais características dos gases e cinzas estão na tabela 19.

Uma parte da malha adotada para o MCFD e utilizada para obter os resultados das grandezas fluidodinâmicas nas simulações do PES está apresentada na figura 78. As dimensões e o número de células adotadas em cada eixo estão apresentadas na tabela 20.

Na figura 79 é apresentada a localização dos pontos de contorno (azul) e das cargas fictícias (vermelho). As distâncias adotadas entre os pontos na malha MSC estão especificadas na tabela 21.

A partir do modelo adotado apresentado na figura 77 e das condições de operação e dados do processo da tabela 19 são apresentados na sequência os resultados obtidos para as grandezas elétricas e

Tabela 18 – Dimensões para o modelo da figura 77

Comprimento das placas, L (mm)	12500
Altura das placas, H (mm)	13000
Distância entre placas, W (mm)	300
Distância entre eletrodos de descarga (mm)	150
Diâmetro dos eletrodos de descarga (mm)	3
a (mm)	300
b (mm)	300
d (mm)	30
Área de coleta ( $m^2$ )	287.5

Tabela 19 – Condições de operação e dados de fabricante

Velocidade de gás e sólidos, U (m/s)	1.05
Tensão de operação, $\phi$ (kV)	56
Velocidade de migração, $\omega$ (cm/s)	7
Tempo de limpeza dos gases, (s)	11.9
Eficiência média, $\eta$ (%)	99.81
Área total de coleta, $A_t$ ( $m^2$ )	16.369
Fluxo dos gases e sólidos na entrada, Q ( $m^3/s$ )	278
Temperatura, T( $^{\circ}C$ )	160
Densidade do gás( $kg/m^3$ )	0.76
Viscosidade do gás (Kg/m.s)	$1.88 \times 10^{-5}$
Particulados na entrada ( $g/Nm^3$ )	54.2
Particulados na saída ( $mg/Nm^3$ )	85
Diâmetro médio das partículas, $d_p$ (m)	$100 \times 10^{-6}$
Densidade das partículas, $\rho_m$ ( $g/cm^3$ )	2.1
Resistividade das partículas, $\rho_{ash}$ ( $\Omega.cm$ )	$1.10^9$
Constante dielétrica da partícula	5

fluidodinâmicas para a metodologia proposta.

### 6.5.3 Resultados

Semelhante ao que foi feito no estudo da usina da África do Sul, neste estudo de caso considerou-se que o PES opera durante 20

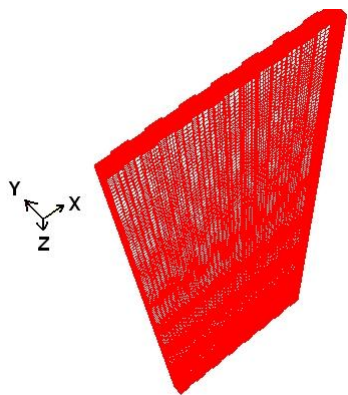


Figura 78 – Região da malha do MCFD para o PES

Tabela 20 – Quantidades e dimensões das células MCFD por eixo

Eixo	Quantidade	Dimensão (mm)
X	125	100
Y	33	10
Z	130	100

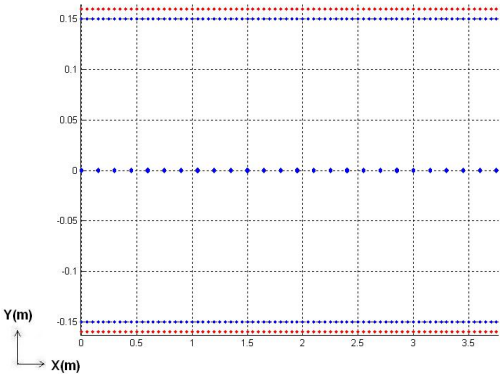


Figura 79 – Localização dos pontos de contorno e cargas fictícias do MSC

Tabela 21 – Distâncias adotadas entre os pontos no MSC

Local	X(mm)	Y(mm)
Malha	20	20
Cargas de Simulação	20	20
Pontos de Contorno	20	20

segundos. Os dados de entrada são aqueles apresentados na figura 77 e nas tabelas 18 e 19 e as condições de contorno conforme especificado anteriormente.

Os resultados das simulações obtidos a partir do MSC, equipotenciais, densidade de carga e campo elétrico podem ser vistos nas figuras 80 à 83.

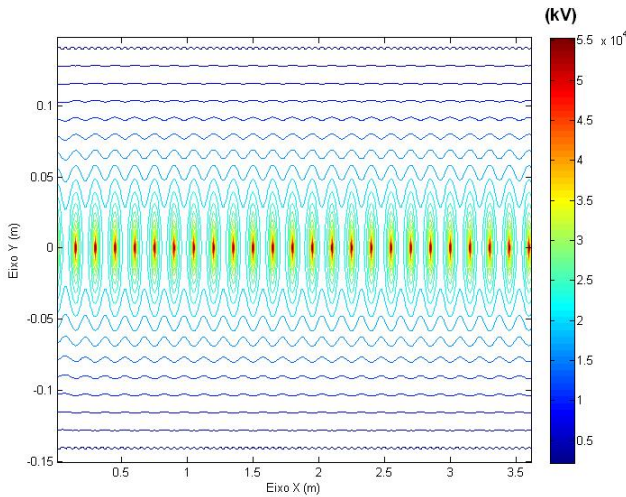


Figura 80 – Equipotenciais ao longo do precipitador

Os resultados apresentados nas figuras 81 à 83 são os esperados para uma condição normal de operação do PES, pois os valores de potencial, campo elétrico e densidade de cargas devem ser maiores na região próxima do eletrodo de descarga e decrescem à medida que se aproximam da placa coletora.

Semelhante ao que foi feito no estudo da usina da África do Sul, três diferentes análises são realizadas para se verificar a eficiência

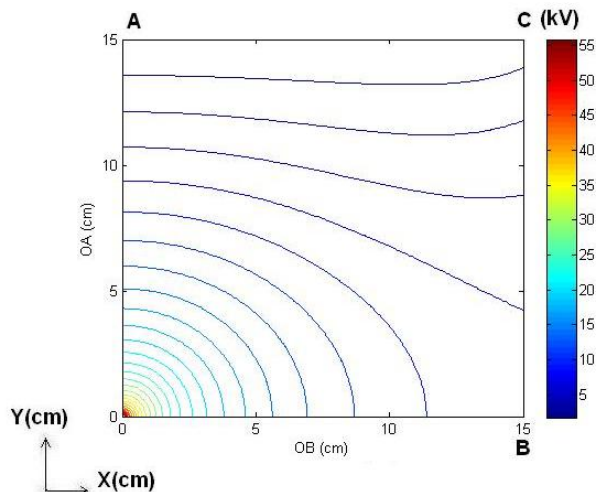


Figura 81 – Equipotenciais no quadrante 0ACB (figura 48)

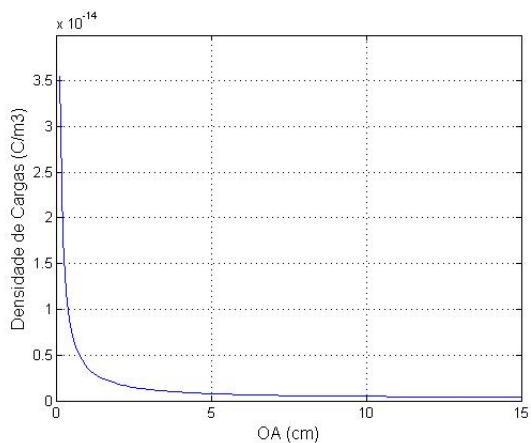


Figura 82 – Densidade de cargas ao longo do segmento OA (figura 48)

do processo fluidodinâmico multifásico de coleta das partículas. Na primeira compara-se a fração de volume ocupada pelas partículas e o gás na entrada e na saída do PES. Na segunda, verifica-se ao longo de todo o comprimento do precipitador a distribuição das partículas. Por último, verifica-se a distribuição das partículas entre as duas placas

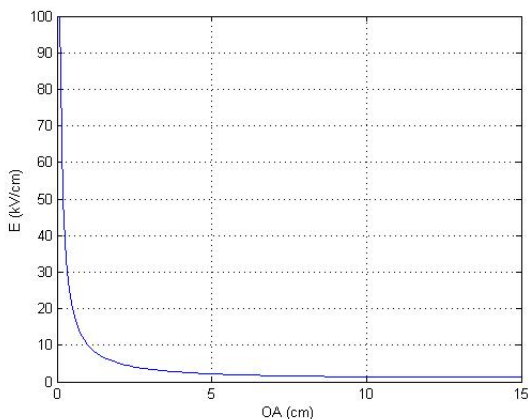


Figura 83 – Módulo do Campo Elétrico ao longo do segmento OA (figura 48)

coletoras analisada num ponto referente à metade do percurso entre a entrada e saída do PES.

Os resultados das distribuições dos fluxos do gás e sólidos e as frações de volume ocupada pelo gás e partículas nas regiões próximas da entrada e da saída do precipitador após o tempo de simulação estão apresentadas respectivamente nas figura 84 e 85, onde as setas nestas figuras representam a direção do fluxo dos gás no PES.

Pode-se observar na figura 84 que as partículas estão homogeneamente distribuídas no fluxo. Já a figura

A evolução da quantidade de partículas aderidas nas placas coletoras a partir da entrada até a saída do PES, ou ao longo do eixo  $x$  na figura 77 (entrada  $z = 0$  cm e saída  $z = 12500$  cm), é apresentada na figura 86.

As informações das distribuições dos fluxos do gás e sólidos e as frações de volume ocupada pelo gás e partículas entre as duas placas coletoras, ou ao longo do eixo  $y$  na figura 77, está apresentada na figura 87.

Pode-se observar na figura 87 que as partículas ficam concentradas na região das placas coletoras ( $y=0$  e  $y=30$  cm onde as frações de vazios ficam próximas de 0.95) e o gás limpo concentra-se no centro do PES, onde a fração de vazios aproxima-se de 1.

Uma comparação entre os resultados obtidos pela metodologia proposta utilizando o MCFD-MS, os dados do PES da usina ter-

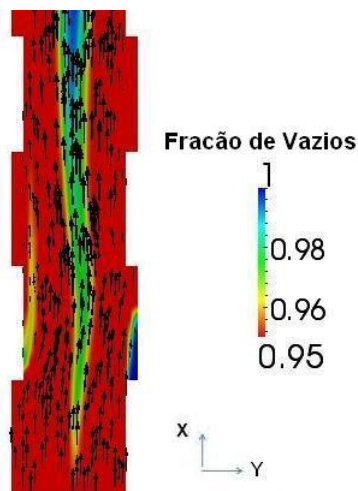


Figura 84 – Concentração do fluxo de gás e sólidos na entrada do PES

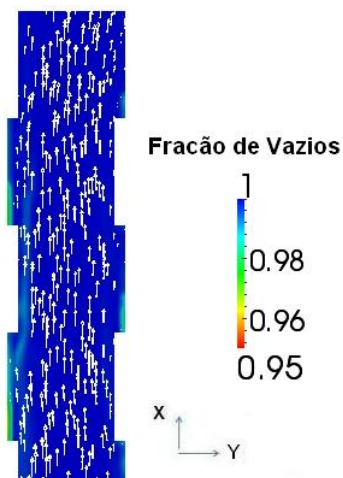


Figura 85 – Concentração do fluxo de gás e sólidos na saída do PES

melétrica, e a equação de Deutsch-Anderson 2.21 estão apresentados na tabela 22.

Observa-se na tabela 22 que os resultados obtidos ficaram bem próximos aos dados reais do PES da usina termelétrica. A máxima

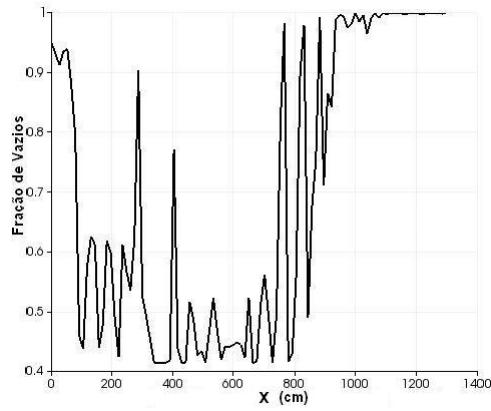


Figura 86 – Distribuição do gás e sólidos ao longo do precipitador

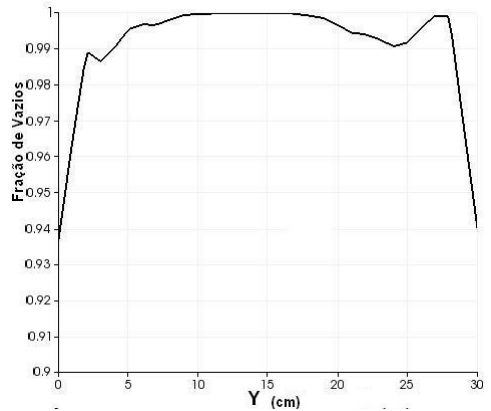


Figura 87 – Concentração de partículas ao longo do eixo y

Tabela 22 – Comparação da Eficiência

-	MSC-MCFD	Dados da Termelétrica	Eq. (2.21)
Eficiência, $\eta$ (%)	99.30	99.81	98.38
Erro, (%)	0.51	0	1.43

diferença encontrada foi de 1,43 % para a equação (2.21). Observa-se ainda que houve uma convergência entre o resultado obtido por meio



da metodologia proposta e o dado de eficiência real do PES da usina.

Considerou-se nesta simulação que o PES operava durante 20 segundos e o passo de tempo de  $1.10^{-4}$ s. Nestas condições, o tempo total de processamento foi de 6 dias, 14 horas e 53 minutos.

## 6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentadas algumas aplicações da metodologia proposta para análise do desempenho de precipitadores eletrostático utilizando os métodos MSC e MCFD.

Estas aplicações foram ilustradas a partir de três estudos de casos, o primeiro envolvendo um precipitador de bancada de pequena escala e outros dois aplicados à PES de usinas termelétricas, uma usina sul-africana e outra brasileira. Para estes estudos de casos buscou-se detalhar os modelos a partir dos dados da literatura como também de campo com a maior quantidade de informações possível para que os modelos se aproximassem bastante ao PES real.

No primeiro estudo de caso optou-se em apresentar um PES de pequeno porte, pois havia uma disponibilidade muito maior de informações na literatura a respeito deste tipos de PES do que de grande porte, facilitando assim o acesso aos dados e também para comparação dos modelos e validação da metodologia.

Diferente da quantidade de informações disponíveis para PES de pequeno porte, existiam poucos dados nas publicações pesquisadas para PES de grande porte e para o segundo estudo de caso utilizou-se os dados de um PES instalado na África do Sul que também foi modelado e validado com a metodologia proposta.

Por último, simulou-se o caso de um PES de uma usina termelétrica brasileira. O modelo foi baseado nos dados de operação e de fabricante de uma usina termelétrica e nas medições de resistividade e permissividade das cinzas leves coletadas na própria usina.

Os resultados mostraram-se bastante próximos aos que foram apresentados na literatura e também àqueles que foram medidos em campo.

A partir destes estudos de casos, conclui-se que comparados aos métodos discretos, a metodologia proposta atendeu às expectativas principalmente com relação a diminuição no tempo computacional. Foi possível observar também, algumas das inúmeras possibilidades de aplicação da metodologia tanto no âmbito de projetos como também na operação de PES. A união dos dois métodos MSC e MCFD possibilitou

a resolução dos problemas, sendo uma boa alternativa principalmente para PES de grande porte.

## 7 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste trabalho, foi apresentada uma metodologia para a análise do comportamento fluidodinâmico multifásico em precipitadores eletrostáticos. Baseou-se em dois diferentes métodos para implementá-la. O primeiro método, MCFD, trata do problema fluidodinâmico multifásico. A partir deste método foi possível calcular a velocidade, a distribuição do fluxo do gás e dos sólidos, a concentração de particulados no PES e a eficiência do processo. O segundo método, MSC, foi utilizado para se calcular as grandezas elétricas: os campos elétricos, as equipotenciais, as densidades de cargas elétricas e finalmente as forças que atuam sobre as partículas.

Para entender melhor o problema a ser investigado, no segundo capítulo foram apresentadas algumas particularidades sobre os PES. Apresentou-se os princípios de funcionamento e as principais características dos eletrodos de descargas, das placas coletoras, do sistema de alimentação, dos batedores e dos coletores. Estes componentes são responsáveis por realizar os principais processos no PES.

Na sequência, introduziu-se as principais equações analíticas existentes na literatura que regem os carregamentos das partículas, a migração, a coleta e a eficiência. Destacou-se por fim, o diâmetro das partículas e a resistividade como um dos principais fatores que impactam na eficiência do processo.

Apresentou-se também uma revisão bibliográfica acerca do MSC no terceiro capítulo. A partir do fundamento teórico foi desenvolvido um código no GNU Octave para calcular as grandezas elétricas de interesse. Este código foi validado por meio de algumas referências bibliográficas.

Conforme previsto na ocasião do exame de qualificação, as equações da teoria de carregamento foram incluídas no código desenvolvido. Isto possibilitou calcular as forças que atuam sobre as partículas carregadas.

As principais equações a respeito do MCFD relacionadas à metodologia proposta também foram apresentadas no quarto capítulo, proporcionando assim, um maior conhecimento a respeito deste método. Baseado no estudo destas equações foi possível definir a equação da quantidade de movimento da fase sólida como o ponto de conexão e acoplamento dos métodos MCFD e MSC.

No quinto capítulo foi apresentado o funcionamento da metodologia e as considerações feitas com relação às equações, códigos e malhas para que fosse possível fazer o acoplamento entre os métodos, possibi-

litando que as contribuições das forças elétricas fossem adicionadas às forças já existentes no escoamento fluidodinâmico multifásico.

Para efetuar as simulações tomando como base o MCFD, utilizou-se o software MFIX como ferramenta para resolver numericamente as equações da formulação fluidodinâmica multifásica. Algumas modificações no código original do software MFIX foram feitas com o objetivo de incluir as informações das grandezas elétricas e das forças calculadas a partir do código do MSC.

O principal objetivo apresentado neste trabalho, foi de aplicar esta nova metodologia em diferentes estudos de casos, levando em consideração alguns dos principais fatores que afetam a eficiência do processo como o diâmetro das partículas, a permissividade, a densidade e a resistividade. Baseado nas condições iniciais e de contorno para cada um dos métodos, foi possível obter a eficiência do processo a partir das informações das concentrações de particulados que entram e saem do PES.

Foram realizadas diversas simulações, algumas destas apresentadas no Capítulo 6. Três estudos de casos foram selecionados, o primeiro estudo baseado num pequeno PES (LONG, 2010), o segundo baseou-se nas características construtivas e de operação de um PES de uma usina termelétrica na África do Sul (EEDEN, 2003) e o terceiro a partir de dados de campo e medições feitas pelo autor para uma usina termelétrica brasileira.

A partir dos resultados destes estudos de casos foi possível constatar que a escolha adequada de alguns parâmetros de simulação impactam significativamente no tempo de processamento para a metodologia desenvolvida. Dentre estes parâmetros pode-se destacar: o tempo mínimo de operação do equipamento para verificar a eficiência do PES, o passo de tempo, o número de células no MCFD e finalmente o número de pontos considerados no MSC.

Nos estudos de casos apresentados procurou-se o equilíbrio entre estes parâmetros, mantendo-os na precisão mínima estabelecida em cada um dos métodos e a possibilidade de ser simulado a partir dos recursos computacionais disponíveis.

Como forma de comparar os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do trabalho, procurou-se simular estes mesmos estudos de casos utilizando métodos discretos. Isto foi feito no próprio software MFIX que permite ser configurado para simular nesta condição. As tentativas para simular os estudos de casos não obtiveram sucesso. Os principais motivos para que isto não acontecesse foram o passo de tempo e o mínimo tamanho das células para que as simulações fos-

sem executadas. Utilizando o mesmo o recurso computacional, caso fossem atendidas estas condições, o tempo necessário para se obter os resultados seria na ordem de meses.

Diante dos resultados destes estudos de casos, pode-se concluir que a metodologia proposta permite modelar PES de pequeno e grande porte. Como foi destacado ao longo deste trabalho, e confirmado nas simulações, esta metodologia se torna ainda mais adequada para PES de grande porte, como por exemplo, os que são utilizados na filtração de gases em usinas termelétricas. Nestes grandes PES, os métodos numéricos que calculam as trajetórias individuais das partícula necessitariam de um esforço computacional extremamente grande para conseguir efetuar todos os cálculos das variáveis de interesse como foi o caso da velocidade, o fluxo e a concentração das partículas.

Com isso, considerando a grande possibilidade de expansão das pesquisas tanto na área de campos elétricos como também na fluidodinâmica utilizando a metodologia apresentada. Propõe-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

1. Implementação e aprimoramento de paralelização do processamento computacional e de outras estratégias que diminuam o tempo computacional envolvido nas simulações relacionadas às aplicações apresentadas neste trabalho;
2. Avaliar a possibilidade da utilização de métodos numéricos híbridos, para partes específicas do PES, tanto para cálculo das grandezas mecânicas como também elétricas. Um exemplo seria utilizar um método discreto nas regiões muito próximas dos eletrodos de descargas e das placas coletoras para calcular com maior precisão os impactos das partículas com estes componentes. Nas demais regiões utilizaria-se um método contínuo para reduzir o tempo de processamento;
3. Expandir os modelos considerando também as reações químicas para um modelo completo considerando desde a queima do combustível até o processo de filtração dos gases no precipitador;

Diante das pesquisas realizadas, da proposta e desenvolvimento da metodologia e com base nos estudos de casos realizados, conclui-se que os objetivos contidos no escopo deste trabalho de Doutorado foram plenamente atingidos.

Como produções científicas que complementam esta tese, foi gerado um trabalho de conclusão de curso (VALERIANO; TAVARES, 2012) na área do MSC para validação do código e foram apresentados também

em dois congressos internacionais os trabalhos (TAVARES; KUO-PENG; SADOWSKI, 2013, 2014). Há ainda um artigo que foi submetido em 2015 ao Journal of Electrostatics.

Ressalta-se que todas as ferramentas implementadas serão disponibilizadas para aproveitamento em futuros trabalhos a serem desenvolvidos no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD), como forma de continuidade das pesquisas relacionadas aos assuntos abordados.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 8969 - Poluição do ar - Terminologia. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, p. 1–26, 1985.
- ABNT. NBR 12019 - Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação de material particulado - Método de ensaio. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, p. 1–12, 1991.
- ABNT. NBR 12140 - Materials used in casting - calculation of granulometrics characteristic - method of test. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, p. 1–3, 1993.
- ABNT. NBR 12827 - Efluentes gasosos com o sistema filtrante no interior do duto ou chaminés de fontes estacionárias - Determinação de material particulado - Método de ensaio. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, p. 1–10, 1993.
- ADAMIAK, K. Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: A review. *Journal of Electrostatics*, v. 71, p. 673–680, 2013.
- ANDERSON, T. B.; JACKSON, R. Fluid mechanical description of fluidized beds. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, v. 6, p. 527, 1967.
- ANDERSON, T. B.; JACKSON, R. Hydrodynamic stability of a fluidized bed. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, v. 6, p. 478, 1967.
- ARENDT, P.; KALLMAN, H. Über den mechanismus der auadung von nebelteilchen. *Zeitschrift fur Physik*, v. 35, p. 421 – 441, 1926.
- ASTM. D150 - Standard Test Methods for AC loss characteristics and permittivity (dielectric constant) of solid electrical insulation. *American Society for testing and materials*, p. 1–50, 1998.
- ASTM. ASTM D257 - standard test methods for dc resistance or conductance of insulating materials. *AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS*, p. 1–18, 1999.
- ATKIN, R. J.; CRAINE, R. E. Continuum theories of mixtures: Basic theory and historical development. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, v. 29, p. 209–244, 1976.

BEDFORD, A.; DRUMHELLER, D. S. Theories of immiscible and structured mixtures. *International Journal of Engineering Science*, v. 21, p. 863–960, 1983.

BEETSTRA, R.; HOEF, M. A. van der; KUIPERS, J. A. M. Drag force of intermediate reynolds number flow past mono - and bidisperse arrays of spheres. *AIChE Journal. American Institute of Chemical Engineers*, v. 53, p. 489–501, 2007.

BEETSTRA, R.; HOEF, M. A. van der; KUIPERS, J. A. M. Numerical study of segregation using a new drag force correlation for polydisperse systems derived from lattice-boltzmann simulations. *Chemical Engineering Science*, v. 62, p. 246–255, 2007.

BIRD, G. A. *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*. Clarendon, UK: Oxford, 1994. 1-65 p.

BNDES, B. N. D. D. *Critérios socioambientais para apoio ao segmento de geração elétrica*. Abril 2015. <<http://www.bndes.gov.br>>. Acessado em 2015.04.17.

BOWEN, R. M. *Theory of Mixtures*, A. C. (Ed.), *Continuum Physics (Vol. 3)*. New York, USA: New York: Academic Press, 1976. 1-65 p.

BREBBIA, C. A.; TELLES, J. F. C.; WROBEL, L. C. *Boundary Element Techniques; Applications Theory and Applications in Engineering*. New York: Springer, 1984.

CHANG, J. S. Theory of diffusion charging of arbitrarily shaped conductive aerosol particles by unipolar ions. *Journal of Aerosol Science*, v. 12, p. 19–26, 1981.

CHOI, B. S.; FLETCHER, C. A. J. Turbulent particle dispersion in an electrostatic precipitator. *Applied Mathematical Modelling*, v. 22, p. 1009–1021, 1998.

COCHET, R. Lois charge des fines particules (submicroniques) etudes theoriques - controles recents spectre de particules. *Colloque Internacional la Physique des Forces Electrostatiques et Leurs Application – Paris: Centre National de la Recherche Scientifique*, v. 102, p. 331–338, 1961.

CONAMA. *Resolução n382*. Brasil: Diario oficial da união, 2006. 49 p.



COOPERMAN, G. A new current-voltage relation for duct precipitators valid for low and high current densities. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA, n. 17, p. 236–239, 1981.

CROWDER, J. W.; HARRISON, T. K. D. P.; SMITH, T. *APTI 413: Control of Particulate Matter Emissions - Student Manual - Chapter 9*. Newport News, 2000.

DIETIKER, J. *MFIX Multiphase Flow with Interphase Exchanges: Cartesian Grid User Guide*. Morgantown: U. S. Department of Energy, 2012. 1-43 p.

DREW, D. A. Mathematical-modeling of 2-phase flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 15, p. 261–291, 1983.

EEDEN, G. C. V. *The numerical modelling of a flue gas precipitator*. Tese (Doutorado) — Potchefstroom University for Christian Higher Education, South Africa, 2003.

ELMOURSI, A. A.; CASTLE, A. S. P. The analysis of corona quenching in cylindrical precipitators using charge simulation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA22, p. 80–85, 1986.

ELMOURSI, A. A.; CASTLE, G. S. P. Modeling of corona characteristics in a wire duct precipitator using the charge simulation technique. *IEEE Transactions On Industry Applications*, IA-23, p. 95–102, 1987.

EPA. *A Manual for the use of Electrostatic Precipitators to collect fly ash particles*. Birmingham, Alabama, 1980.

EPA, U. S. E. P. A. *APTI Virtual Classroom*. Outubro 2012. <<http://yosemite.epa.gov/oaqps>>. Acessado em 2012.10.31.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, v. 48, p. 89–94, 1952.

FJELD, R. A.; GAUNTT, R. O.; MCFARLAND, A. R. Continuum field-diffusion theory for bipolar charging of aerosols. *Journal of Aerosol Science*, v. 14, p. 541 – 556, 1983.

FJELD, R. A.; MCFARLAND, A. R. Evaluation of selected approximations for calculating particle charging rates in the continuum regime. *Aerosol Science and Technology*, v. 10, p. 535 – 549, 1989.

FUCHS, N. A. The charges on the particles of aerocolloids. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR Seriya Geogracheskaya, Geozicheskaya*, v. 11, p. 341, 1947.

FUCHS, N. A. On the stationary charge distribution on aerosol particles in a bipolar ionic atmosphere. *Geofísica Pura e Aplicata, Geozicheskaya*, v. 56, p. 185, 1963.

GALLIMBERTI, I. The mechanism of the long spark formation. *Journal de Physique*, v. 40, p. 193–250, 1979.

GALLIMBERTI, I. Recent advancements in the physical modelling of electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics*, v. 43, p. 219–247, 1998.

GERA, D.; SYAMLAL, M.; BRIEN, T. J. O. Hydrodynamics of particle segregation in fluidized beds. international journal of multiphase flow. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 30, p. 419–428, 2004.

GOLDSCHMIDT, M. J. V.; BEETSTRA, R.; KUIPERS, J. A. M. Hydrodynamic modelling of dense gas-fluidised beds: comparison and validation of 3d discrete particle and continuum models. *Powder Technology*, v. 142, p. 23–47, 2004.

GUENTHER, C.; SYAMLAL, M. The effect of numerical diffusion on simulation of isolated bubbles in a gas-solid fluidized bed. *Powder Technology*, v. 116, p. 142–154, 2001.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics*. USA: Jonh Wiley and Sons, 2000. 593 p.

HAO, J. et al. A fictitious domain/distributed lagrange multiplier method for the particulate flow of oldroyd-b fluids: A positive definiteness preserving approach. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 156, p. 95–111, 2009.

HEINECK, S. H.; BICA, A. V. D.; CONSOLI, N. C. Estudo da morfologia e condutividade hidraulica de mistura de cinza de carvão-bentonita. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 2002.

HERRMANN, H. J.; LUDING, S. Modeling granular media on the computer. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, v. 10, p. 189, 1998.

IEA. *Key World Energy Statistics 2013*. França: International Energy Agency, 2013. 82 p.

INOUE, T. Theoretical consideration of charge simulation method for numerical conformal mappings in a ring domain. *Internation Journal Math. and Math. Sci.*, v. 21, p. 289–298, 1998.

ISHII, M.; MISHIMA, K. 2-fluid model and hydrodynamic constitutive relations. *Nuclear Engineering and Design*, v. 82, p. 107–126, 1984.

JACKSON, R. Locally averaged equations of motion for a mixture of identical spherical particles and a newtonian fluid. *Chemical Engineering Science*, v. 52, p. 2457–2469, 1997.

JACKSON, R. *The dynamics of fluidized particles*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.

JAWOREK, A.; KRUPA, A.; CZECH, T. Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review. *Journal of Electrostatics Elsevier*, v. 65, p. 133–155, 2007.

JONES, J. E.; DAVIES, H. A critique of the Deutsch assumption. *Journal of Physics*, v. 25, p. 1749–1759, 1992.

JOSEPH, D. D. et al. Ensemble averaged and mixture theory equations for incompressible fluid particle suspension. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 16, p. 35–42, 1990.

KERSTNER, E. K. et al. Estudo da utilização de cinzas da combustão de carvão no processo de fabricação de componentes por metalurgia do pó convencional. *Congresso Anual da ABM*, p. 1–12, 2010.

KIRKPATRICK, M. P.; ARMFIELD, S. W.; KENT, J. H. A representation of curved boundaries for the solution of the navier stokes equations on a staggered three-dimensional cartesian grid. *Journal of Computation Physics*, v. 184, p. 1–36, 2003.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Oxford: Newnes, 2000. 254-270 p.

LAMI, E.; MATTACHINI, F.; GALLIMBERTI R TURRI, U. T. I. A numerical procedure for computing the voltage-current characteristics in electrostatic precipitator configurations. *Journal of Electrostatics*, v. 34, p. 385–399, 1995.

LAWLESS, P. A. Particle charging bounds, symmetry relations and an analytic charging rate model for the continuum regime. *Journal of Aerosol*, v. 27, p. 191 – 215, 1996.

LI, T.; BENYAH, S. Revisiting johnson and jackson boundary conditions for granular flows. *AIChE Journal*, v. 58, p. 2058–2068, 2012.

LIU, B. Y. H. A.; YEH, H. C. On the theory of charging of aerosol particles in an electric field. *Journal of Applied Physics*, v. 39, p. 1396–1402, 1968.

LONG, Q. Y. Z. Evaluation of various particle charging models for simulating particle dynamics in electrostatic precipitators. *Journal of Aerosol Science*, v. 41, p. 702–718, 2010.

LUNDGREN, T. S. Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 51, p. 273, 1972.

MACDONALD, J. R. *A Mathematical Model of Electrostatic Precipitation (Revision 1): Volume I - Modeling and Programing*. Birmingham, Alabama, 1978.

MALIK, N. H. A review of charge simulation method and its applications. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 24, p. 3–20, 1989.

MASSOUDI, M. Constitutive relations for the interaction force in multicomponent particulate flows. *International Journal of Non-linear Mechanics*, v. 38, p. 313–336, 2003.

MENDES, B. A. O.; CARNEIRO, M. C.; PONTES, F. V. M. Determinação de elementos em cinzas volantes de carvão utilizando digestão assistida por ultrassom e quantificação por icp-oes. *Jornada de Iniciação Científica CETEM*, p. 248–254, 2009.

MIZUNO, A. Electrostatic precipitation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 7, p. 615–624, 2000.

MORELAND, K. *The Paraview Tutorial - Version 3.8*. [S.l.]: Sandia National Laboratories, 2011. 1-110 p.

MURPHY, A. T.; ADLER, F. T.; PENNEY, G. W. A theoretical analysis of the effects of an electric field on the charging of fine

particles. *Transaction of America Institute of Electrical Engeneering*, v. 78, p. 318 – 326, 1959.

NAVARRETE, B. et al. Influence of plate spacing and ash resistivity on the efficiency of electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics*, v. 39, p. 65–81, 1997.

NEIMARLIJA, N.; DEMIRDZIC, I.; MUZAFERIJA, S. Finite volume method for calculation of electrostatic fields in electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics*, v. 67, p. 37–47, 2009.

NISHIMURA, R.; NISHIMORI, K.; ISHIHARA, N. Determining the arrangement of fictitious charges in charge simulation method using genetic algorithms. *Journal of Electrostatics*, v. 49, p. 95–105, 2000.

NISHIMURA, R.; NISHIMORI, K.; ISHIHARA, N. Automatic arrangement of fictitious charges and contour points in charge simulation method for polar coordinate system. *Journal of Electrostatics*, v. 51, p. 618–624, 2001.

OGLESBY, S.; NICHOLS, G. B. *Electrostatic Precipitation, Pollution Engineering and Technology*. New York: Basel, 1978.

PANNALA, S.; SYAMLAL, M.; BRIEN, T. J. O. *Computarional Gas-Solids Flows and Reacting Systems: Theory, Methods and Practice*. New York, USA: Engineering Science Reference, 2009. 1-65 p.

PARASRAM, N. T. Particle motion in electrostatic precipitators. *Thesis - University of London - Department of Mechanical Engineering*, p. 1–291, 2001.

PARKER, K. R. *Aplied Electrostatic Precipitator*. New York: Blackie Academic and Professional, 1997.

PAUTHENIER, M.; MOREAU-HANOT, M. Charging of spherical particles in an ionizing field. *Journal of Physics Radium*, v. 3, p. 590–613, 1932.

PENNEY, G. W.; KLINGER, E. H. Contact potentials and the adhesion of dust. *Transaction of American Institute of Electrical Engineering*, I, p. 200–204, 1962.

PROSPERETTI, A. *Computacional Methods for Multiphase Flow*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

PUNEKAR, G. S.; KISHORE, N. K.; SHASTRY, H. S. Y. Effect of non uniformity factors and assignment factors on errors in charge simulation method with point charge model. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, p. 914–918, 2008.

RAWLINGS, J. B.; EKERDT, J. G. *GNU Octave 4.0*. Setembro 2015. <<http://www.gnu.org/software/octave>>. Acessado em 2015.09.20.

ROCHA, J. C. et al. Reaproveitamento das cinzas pesadas do complexo termelétrico Jorge Lacerda na elaboração de materiais de construção: Aspectos tecnológicos e ambientais. *Décimo Quinto Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, p. 1–5, 1999.

ROHMANN, H. Z. Methode zur messung der grosse von schwebeteilch. *Zeitschrift fur Physik*, v. 17, p. 253 – 265, 1923.

SAFFMAN, P. G. Condition at surface of a porous medium. *Studies in Applied Mathematics*, v. 50, p. 93, 1971.

SAFFMAN, P. G. Spatial averaging in the mechanics of heterogeneous and dispersed systems. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 5, p. 353–385, 1979.

SIGMOND, R. S. Simple approximation treatment of unipolar space-charge dominated coronas: the warburg law and the saturation current. *Journal Applied Physics*, v. 53, p. 891–898, 1982.

SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P. A charge simulation method for the calculation of high voltage fields. *IEEE PES Winter Meeting*, p. 1660–1668, 1974.

SIQUEIRA, J. S. D. Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: Produção de Argamassas. *Dissertação Programa de Pós graduação Universidade Federal do Pará*, p. 1–92, 2011.

SMITH, W. B.; MCDONALD, J. R. Development of a theory for the charging of particles by unipolar ions. *Journal of Aerosol Science*, v. 7, p. 151 – 166, 1976.

SNIDER, D. M. An incompressible three-dimensional multiphase particle-in-cell model for dense particle flows. *Journal of computational physics*. *Journal of Computational Physics*, v. 170, p. 523–549, 2001.

SNIDER, D. M.; ROURKE, P. J. O. Sediment flow in inclined vessels calculated using a multiphase particle-in-cell model for dense particle flows. *Journal of Multiphase Flow*, v. 24, p. 1359–1382, 1998.

STEINBIGLER, H. *Anfangsfeldstaerken und Ausnutzungsfaktoren rotations-symmetrischer Elektrodenanordnungen*. Munich: Dr Thesis, 1969.

SYAMLAL, M.; ROGERS, W.; BRIEN, T. J. O. *MFIX Multiphase Flow with Interphase Exchanges - Documentation: Theory Guide*. Morgantown: U. S. Department of Energy, 1993. 101 p.

TAVARES, A. A.; KUO-PENG, P.; SADOWSKI, N. Flow and electric field in electrostatic precipitator using multiphase continuum flow and charge simulation method. *IEEE Conference on the Computation of the Eletromagnetic Fields - COMPUMAG 2013*, p. 1–4, 2013.

TAVARES, A. A.; KUO-PENG, P.; SADOWSKI, N. Modeling of electrostatic precipitator in coal-fired power plant using mcfd and csm. *IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation - CEFC 2014*, p. 1–4, 2014.

TRUESEDELL, C. Sulle basi della thermoeccanica. *Randi Lincei*, v. 41, p. 33–38 158–166, 1957.

TSUJI, Y.; KAWAGUCHI, T.; TANAKA, T. Particle simulation of 2-dimensional fluidized-bed. *Powder Technology*, v. 77, p. 79–87, 1993.

TURNER, J. H. et al. *Air Pollution Engineering Manual*. New York: Air and Waste Management Association, 1992. 89-113 p.

VALERIANO, G. T.; TAVARES, A. A. Cálculo de campo elétrico a partir de modelos numéricos: Uma abordagem utilizando o método de simulação de cargas. *Trabalho de Conclusão de Curso - SATC*, p. 78, 2012.

WEISS, P. Fictious peaks and edges in electric fields. *3rd Int. Symp. on High Voltage Engg*, v. 11.21, 1979.

WHITE, H. J. Particle charging in electrostatic precipitation. *Transaction of America Institute of Electrical Engeenering*, v. 70, p. 1186–1191, 1951.

WHITE, H. J. Industrial electrostatic precipitation. *Addison Wesley Pergamon Press*, p. 157, 1963.

WILLIAMS, J.; CONNOR, R. O. Discrete element simulation and the contact problem. archives of computational methods in engineering. *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 6, p. 279–304, 1999.

YAMAMOTO, T.; OKUDA, M.; OKUBO, M. Three-dimensional ionic wind and electrohydrodynamics of tuft/point corona electrostatic precipitator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 39, p. 1602–1607, 2003.

ZAMANY, J. *Modeling of Particle Transport in Commercial Eletrostatic Precipitators*. Tese (Doutorado) — University of Denmark, Copenhagen, Denmark, 1992.

ZHANG, D. Z.; PROSPERETTI, A. Averaged equations for inviscid disperse 2-phase flow. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 267, p. 185–219, 1994.

ZHANG, D. Z.; PROSPERETTI, A. Ensemble phase-averaged equations for bubbly flows. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 6, p. 2956–2970, 1994.



## **ANEXO A – Caracterização das Cinzas**



## A.1 DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO

Nas figuras 89 a 100 são apresentados os resultados obtidos a partir de medições do diâmetro médio das cinzas do terceiro estudo de caso. Utilizou-se para este trabalho o agitador de peneiras apresentado na figura 88. A escala das imagens obtidas foi convertida de pixels para milímetros para poder visualizar o diâmetro médio das partículas nas amostras.



Figura 88 – Equipamento utilizado para o peneiramento

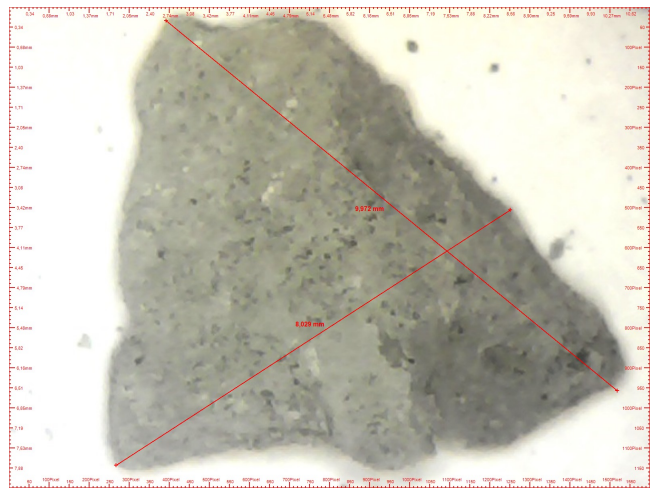


Figura 89 – Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 4

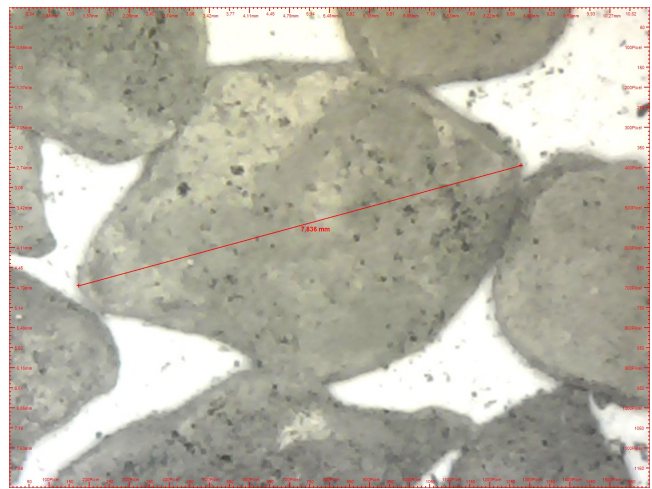


Figura 90 – Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 6

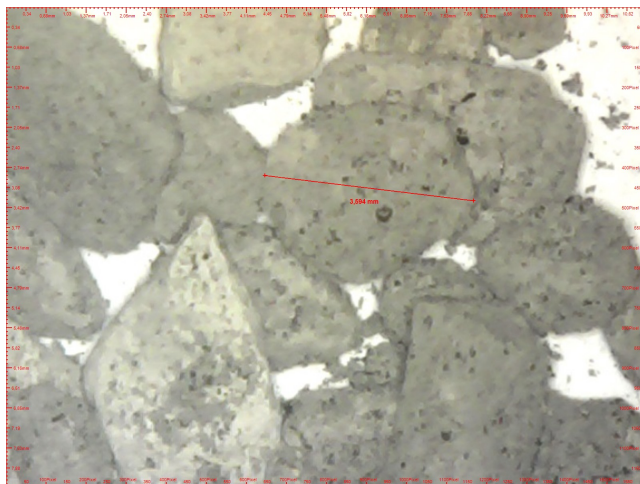


Figura 91 – Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 12

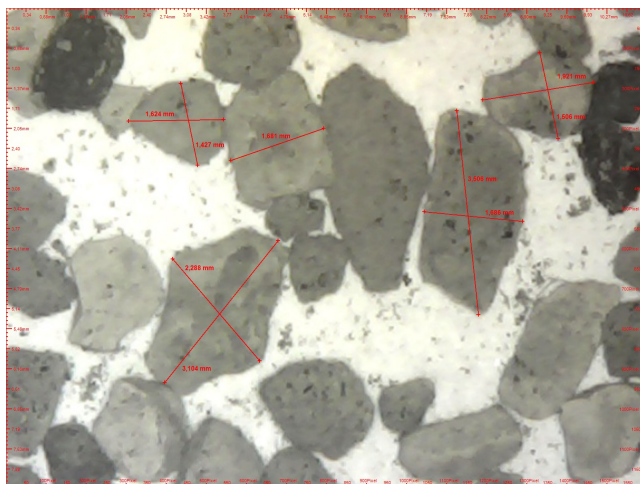


Figura 92 – Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 20

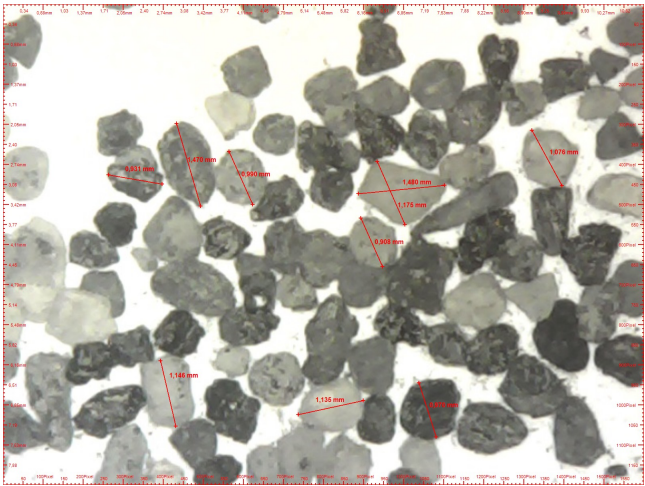


Figura 93 – Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 30

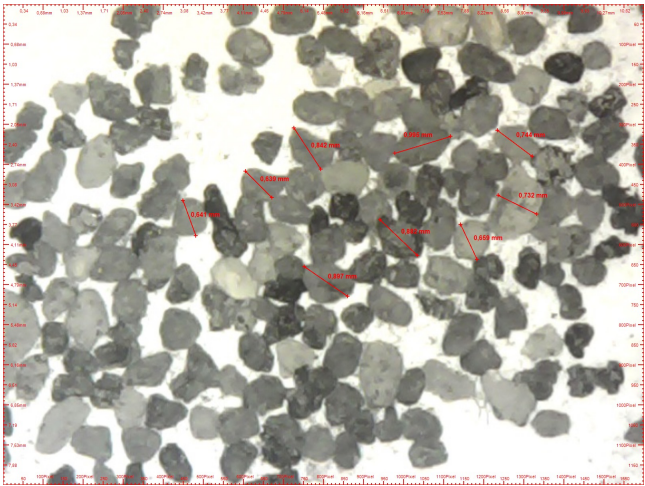


Figura 94 – Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 40



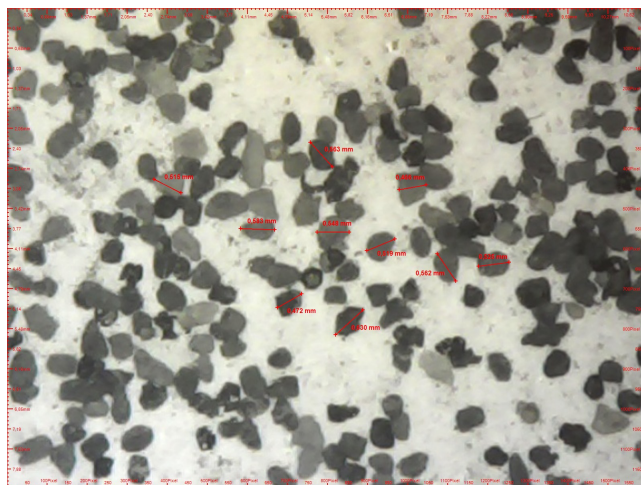


Figura 95 – Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 50

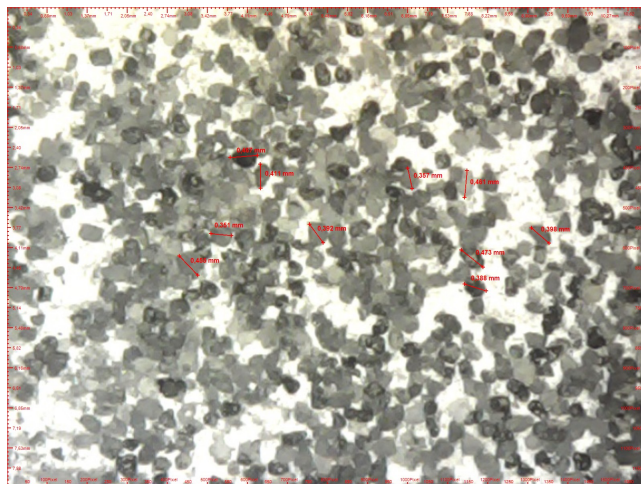


Figura 96 – Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 70

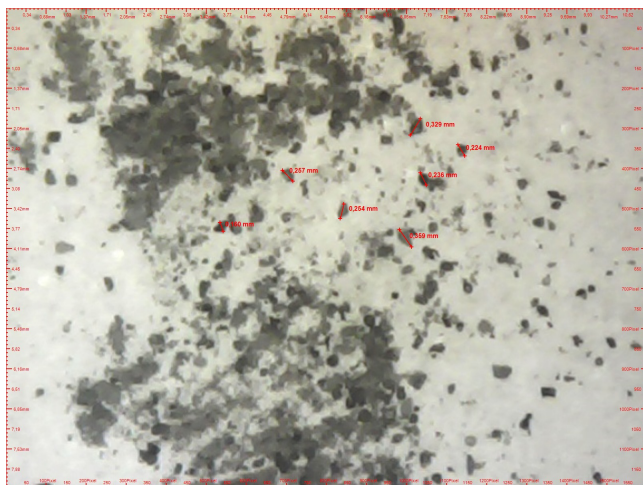


Figura 97 – Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 100

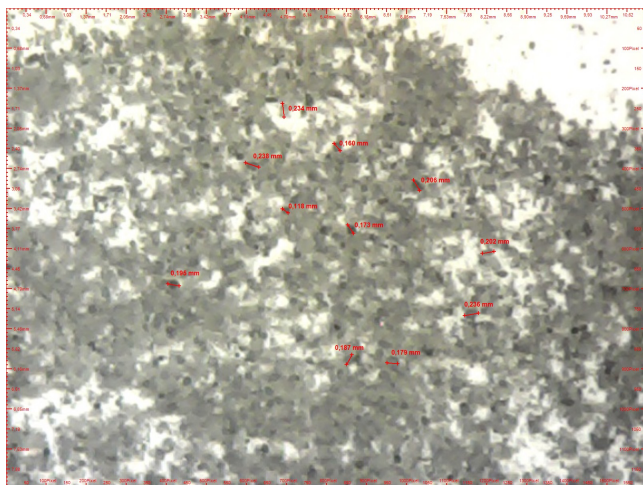


Figura 98 – Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 140



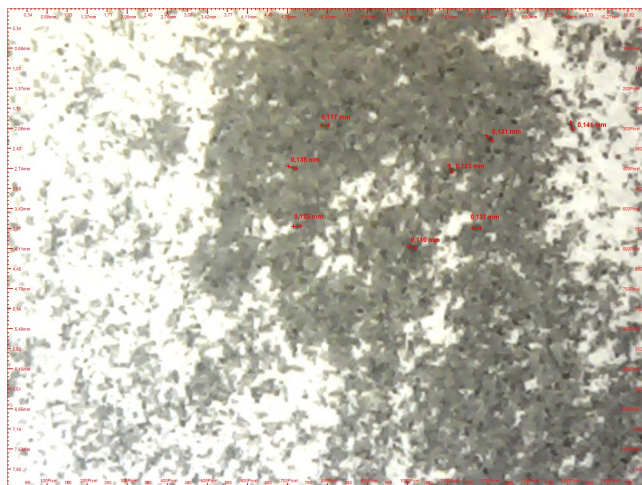


Figura 99 – Distribuição Granulométrica da cinza - ASTM 200

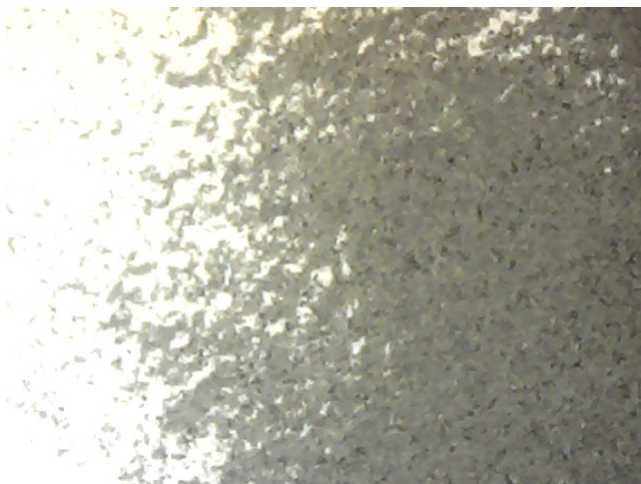


Figura 100 – Distribuição Granulométrica da cinza - Prato



## **ANEXO B – Coeficientes de Potencial**



## B.1 COEFICIENTE DE POTENCIAL CARGA PONTUAL

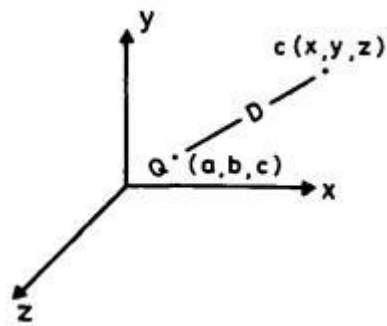


Figura 101 – Carga Pontual

$$P = (4\pi\epsilon D)^{-1} \quad (\text{B.1})$$

$$f_x = (x - a)(4\pi\epsilon D^3)^{-1} \quad (\text{B.2})$$

$$f_y = (y - b)(4\pi\epsilon D^3)^{-1} \quad (\text{B.3})$$

$$f_z = (z - c)(4\pi\epsilon D^3)^{-1} \quad (\text{B.4})$$

## B.2 COEFICIENTE DE POTENCIAL LINHA INFINITA

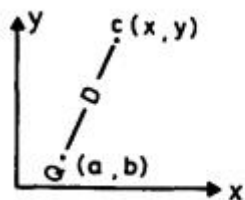


Figura 102 – Linhas Infinitas

$$P = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_0}{D} \quad (\text{B.5})$$

$$f_x = \frac{(x-a)}{2\pi\epsilon D^2} \quad (\text{B.6})$$

$$f_x = \frac{(y-b)}{2\pi\epsilon D^2} \quad (\text{B.7})$$

**ANEXO C – Arquivo de Entrada do software MFIX  
(mfix.dat)**





```

RUN_NAME = 'Precipitador'
DESCRIPTION = 'Modelo do precipitador adotado por LONG'
RUN_TYPE = 'NEW'
UNITS = 'cgs'
TIME = 0.0
TSTOP = 0.5
DT = 1.0E-4
ENERGY_EQ = .FALSE.
SPECIES_EQ = .FALSE. .FALSE.
GRAVITY = 0.0
norm_g = 0
Norm_s = 0
! boundary condition.
CARTESIAN_GRID = .TRUE.
N_QUADRIC = 3
TOL_F = 1.0D-7
FAC_DIM.MAX_CUT_CELL = 0.1
ITERMAX_INT = 5000
QUADRIC_FORM(1) = 'Z-CYL-EXT'
RADIUS(1) = 0.1
QUADRIC_FORM(2) = 'Z-CYL-EXT'
RADIUS(2) = 0.1
QUADRIC_FORM(3) = 'Z-CYL-EXT'
RADIUS(3) = 0.1
t_x(1) = 2.5
t_y(1) = 7.5
t_z(1) = 0.0
t_x(2) = 2.5
t_y(2) = 12.5
t_z(2) = 0.0
t_x(3) = 2.5
t_y(3) = 17.5
t_z(3) = 0.0
N_GROUP = 1
GROUP_SIZE(1) = 3
GROUP_Q(1,1) = 1
GROUP_Q(1,2) = 2
GROUP_Q(1,3) = 3
GROUP_RELATION(1) = 'AND'
PRINT_PROGRESS_BAR = .TRUE.
WRITE_DASHBOARD = .TRUE.

```

```

WRITE_VTK_FILES = .TRUE.
TIME_DEPENDENT_FILENAME = .TRUE.
VTK_DT = 0.05
VTK_VAR = 1 2 3 4 11 101
COORDINATES = 'cartesian'
XLENGTH = 5
YLENGTH = 25
ZLENGTH = 5
IMAX = 50
JMAX = 52
KMAX = 5
CPX = 2.0 3.0 5.0
NCX = 20 10 20
ERX = 0.1 0.1 0.1
CPY = 7.0 8.0 12.0 13.0 17.0 18.0 25.0
NCY = 7 10 4 10 4 10 7
ERY = 1 .1 1 .1 1 .1 1
! Gas-phase
MU_g0 = 1.88E-4
RO_g0 = 1.24E-3
! Fase sólida
RO_s = 3.970
D_p0 = 0.0008
e = 0.9
C_e = 0.8
e_w = 0.8
Phi = 30.0
EP_star = 0.42
phi_w = 0.0
PHIP = 0.6
! Condições Iniciais
IC_X_w(1) = 0.0
IC_X_e(1) = 5.0
IC_Y_s(1) = 0.0
IC_Y_n(1) = 25
IC_Z_b(1) = 0.0
IC_Z_t(1) = 5.0
IC_EP_g(1) = 1.0
IC_U_g(1) = 0.0
IC_V_g(1) = 0.0
IC_W_g(1) = 0.0

```

```

IC_U_s(1,1) = 0.0
IC_V_s(1,1) = 0.0
IC_W_s(1,1) = 0.0
IC_T_g(1) = 294.0
! Condições de Contorno
BC_X_w(1) = 0.0
BC_X_e(1) = 5.0
BC_Y_s(1) = 0.0
BC_Y_n(1) = 0.0
BC_Z_b(1) = 0.0
BC_Z_t(1) = 5.0
BC_TYPE(1) = 'MI'
BC_EP_g(1) = 0.95
BC_U_g(1) = 0.0
BC_V_g(1) = 100.0
BC_W_g(1) = 0.0
BC_U_s(1,1) = 0.0
BC_V_s(1,1) = 100.0
BC_W_s(1,1) = 0.0
BC_T_g(1) = 294.0
BC_ID-Q(1) = 12
BC_TYPE(12) = 'CG_PSW'
BC_Uw_g(12) = 0.0
BC_Vw_g(12) = 0.0
BC_Ww_g(12) = 0.0
BC_Uw_s(12,1) = 0.0
BC_Vw_s(12,1) = 0.0
BC_Ww_s(12,1) = 0.0
BC_hw_s(12,1) = 0.0
BC_Thetaw_m(12,1) = 0.0
BC_C.Theta_m(12,1) = 0.0
BC_JJ_PS(12) = 1 !Johnson-Jackson BC para sólidos
BC_ID-Q(2) = 13
BC_TYPE(13) = 'CG_PSW'
BC_Uw_g(13) = 0.0
BC_Vw_g(13) = 0.0
BC_Ww_g(13) = 0.0
BC_Uw_s(13,1) = 0.0
BC_Vw_s(13,1) = 0.0
BC_Ww_s(13,1) = 0.0
BC_hw_s(13,1) = 0.0

```

```

BC_Thetaw_m(13,1) = 0.0
BC_C_Theta_m(13,1) = 0.0
BC_JJ_PS(13) = 1 !Johnson-Jackson BC para sólidos
BC_ID_Q(3) = 14
BC_TYPE(14) = 'CG_PSW'
BC_Uw_g(14) = 0.0
BC_Vw_g(14) = 0.0
BC_Ww_g(14) = 0.0
BC_Uw_s(14,1) = 0.0
BC_Vw_s(14,1) = 0.0
BC_Ww_s(14,1) = 0.0
BC_hw_s(14,1) = 0.0
BC_Thetaw_m(14,1) = 0.0
BC_C_Theta_m(14,1) = 0.0
BC_JJ_PS(14) = 1 !Johnson-Jackson BC para sólidos
! Saida
BC_TYPE(3) = 'PO'
BC_P_g(3) = 0
BC_X_w(3) = 0
BC_X_e(3) = 5
BC_Y_s(3) = 25
BC_Y_n(3) = 25
BC_Z_b(3) = 0
BC_Z_t(3) = 5
!Wall
BC_X_w(4) = 0
BC_X_e(4) = 0
BC_Y_s(4) = 0
BC_Y_n(4) = 25
BC_Z_b(4) = 0
BC_Z_t(4) = 5
BC_TYPE(4) = 'PAR_SLIP_WALL'
BC_Uw_g(4) = 0.0
BC_Vw_g(4) = 0.0
BC_Ww_g(4) = 0.0
BC_Uw_s(4,1) = 0.0
BC_Vw_s(4,1) = 0.0
BC_Ww_s(4,1) = 0.0
BC_hw_s(4,1) = 0.0
BC_Thetaw_m(4,1) = 0.0
BC_C_Theta_m(4,1) = 0.0

```

```

BC_JJ_PS(4) = 1 !Johnson-Jackson BC para sólidos
!Wall
BC_X_w(5) = 5
BC_X_e(5) = 5
BC_Y_s(5) = 0
BC_Y_n(5) = 25
BC_Z_b(5) = 0
BC_Z_t(5) = 5
BC_TYPE(5) = 'PAR_SLIP_WALL'
BC_Uw_g(5) = 0.0
BC_Vw_g(5) = 0.0
BC_Ww_g(5) = 0.0
BC_Uw_s(5,1) = 0.0
BC_Vw_s(5,1) = 0.0
BC_Ww_s(5,1) = 0.0
BC_hw_s(5,1) = 0.0
BC_Thetaw_m(5,1) = 0.0
BC_C.Theta_m(5,1) = 0.0
BC_JJ_PS(5) = 1 !Johnson-Jackson BC para sólidos
!
! Output Control
! OUT_DT = 10.
RES_DT = 0.01
NLOG = 25
FULL_LOG = .TRUE.
Resid_string = "P0", "P1", "U0", "U1","V0", "V1", "W0",
"W1"
SPX_DT = 0.05 0.05 0.05 0.05 100. 100. 100. 100. 100.
NODESI = 1
NODESJ = 1
NODESK = 1
LEQ_IT = 9*50

```